ORGANIZADOR
Henrique Ajuz Holzmann
INNOVATE:
ENGENHARIA MECÂNICA
Atena
Editora
Ano 2023

ORGANIZADOR
Henrique Ajuz Holzmann
INNOVATE:
ENGENHARIA MECÂNICA
Atena
Editora
Ano 2023

CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA E ENGENHARIAS

Innovate: Engenharia mecânica

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizador: Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

I58 Innovate: Engenharia mecânica / Organizador Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2023.

Formato: PDF
Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader
Modo de acesso: World Wide Web
Inclui bibliografia
ISBN 978-65-258-1324-0
DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.240231205

1. Engenharia mecânica. I. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). II. Título.

CDD 621

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

APRESENTAÇÃO

A Engenharia Mecânica pode ser definida como o ramo da engenharia que aplica os princípios de física e ciência dos materiais para a concepção, análise, fabricação e manutenção de sistemas mecânicos. O aumento no interesse por essa área se dá principalmente pela escassez de matérias primas, a necessidade de novos materiais que possuam melhores características físicas e químicas e a necessidade de reaproveitamento dos resíduos em geral.

Nos dias atuais a busca pela redução de custos, aliado a qualidade final dos produtos é um marco na sobrevivência das empresas, reduzindo o tempo de execução e a utilização de materiais.

Neste livro são apresentados trabalho teóricos e práticos, relacionados a área de mecânica e materiais, dando um panorama dos assuntos em pesquisa atualmente. Sendo hoje que utilizar dos conhecimentos científicos de uma maneira eficaz e eficiente é um dos desafios dos novos engenheiros

De abordagem objetiva, a obra se mostra de grande relevância para graduandos, alunos de pós-graduação, docentes e profissionais, apresentando temáticas e metodologias diversificadas, em situações reais.

Boa leitura

Henrique Ajuz Holzmann

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

ADEQUAÇÃO DE PRENSAS MECÂNICAS EXCÊNTRICAS ÀS NORMAS DE SEGURANÇA VIGENTES

Data de submissão: 04/04/2023 *Data de aceite: 02/05/2023*

Jomar Berton Junior
Instituto Federal do Paraná – IFPR
http://lattes.cnpq.br/4714967818055223

Tiago Machado e Silva
Instituto Federal do Paraná – IFPR
http://lattes.cnpq.br/0344174209179735

João Bernardo Aranha Ribeiro
Instituto Federal do Paraná – IFPR
https://lattes.cnpq.br/9027441032059817

RESUMO: A invenção das máquinas industriais, foi um marco muito importante na história, visto que estas economizam tempo de execução do trabalhador. Porém, problemas de segurança no uso delas, também surgiram. No interior do Brasil, há diversas fábricas em pleno vapor, que utilizam máquinas extremamente antigas, e sem nenhuma ou pouca adequação de normas de segurança. Devido a isso, o objetivo do trabalho foi a adequação das máquinas em uma fábrica de molas em Apucarana, PR, Brasil, às normas vigentes, mais especificamente a NR – 12. Portanto, foi possível realizar a adequação em diversas máquinas, trazendo assim, segurança para os trabalhadores ali presentes.

PALAVRAS-CHAVE: Segurança do trabalho. NR 12. Máquinas industriais.

ADJUSTMENT OF ECCENTRIC MECHANICAL PRESSES TO CURRENT SAFETY STANDARDS

ABSTRACT: The invention of industrial machines was a very important milestone in history, as they save the worker's execution time. However, security problems in their use also arose. In the interior of Brazil, there are several industries in full swing, using extremely old machines, with little or no adequacy of safety standards. Due to this, the objective of the work was the adequacy of the machines in a spring industries in Apucarana, PR, Brazil, to the current norms, more specifically the NR - 12. Therefore, it was possible to carry out the adequacy in several machines, thus bringing, safety for the workers present there.

KEYWORDS: Workplace Safety. NR 12. Industrial machines.

1 I INTRODUÇÃO

A construção de uma máquina, quando projetada apenas com objetivos de aumento de produção, sem incluir a

segurança do trabalhador, é um grande problema, principalmente quando se negligenciam legislações vigentes que evitariam riscos ao operador e demais trabalhadores envolvidos no processo produtivo (Sankaranarayanan et al., 2022).

A segurança do trabalhador deve ser garantida pelo empregador, dessa forma, as máquinas devem prever possíveis falhas e desatenções decorrentes da operação, bem como da experiência e da repetição do trabalhador, como visto em Gao e Wang, 2023, onde notaram uma diminuição nos comportamentos seguros em profissionais do ramo de aviação conforme a maior experiencia dos mesmos no cargo. Percebe-se uma tendência do trabalhador a negligenciar algumas atitudes que são preventivas, com isso, aumentando a probabilidade de acidentes.

As máquinas utilizadas nas fábricas, na grande maioria das vezes, não atendem todos os requisitos de segurança atual, devido às constantes atualizações das normas de segurança. Muitos equipamentos foram comprados e alterados durante períodos em que as normas não possuíam tanta rigidez, ou então, alguns dispositivos de segurança são retirados ou desativados pelos operadores que não foram corretamente instruídos quanto à segurança destas máquinas (Fiergs, 2006). Dessa forma, surge a necessidade de adequar estes equipamentos às normas de segurança mais atuais, de forma que os operadores e demais trabalhadores não estejam correndo riscos de acidentes (Xuecai et al., 2022; Fiergs, 2006).

Em uma fábrica de molas para veículos automotores situada na cidade de Apucarana, PR, a maioria das máquinas ali disponíveis, são antigas, isto é, uso a mais de 25 anos, como por exemplo prensas mecânicas excêntricas de engate por chaveta (PMEEC).

Neste tipo de máquina, o espaço entre o martelo e a mesa da prensa, onde se coloca o ferramental, é chamado Zona de Prensagem, sendo a área onde o martelo implica a força. Nela encontra-se a maior área de risco, visto que a exposição do operador pode ocorrer a cada ciclo, repetindo-se várias vezes ao longo da jornada de trabalho. Devido a isto, a mesma deverá ser impedida o acesso por ambos os lados, através de proteção física durante o uso em regime de trabalho (Nascimento, 2010).

As prensas mecânicas excêntricas de engate por chaveta são equipamentos amplamente utilizados na indústria metalúrgica para realizar operações de conformação de chapas metálicas. No entanto, essas máquinas apresentam riscos significativos para a segurança dos operadores, como o esmagamento de membros, projeção das peças sobre o operador, além da exposição a ruídos e vibrações.

Para manutenção ou troca de ferramental, poderá se dispor de proteção móvel intertravada que garanta a parada total da máquina; deverá ainda se utilizar dispositivo de retenção mecânica (calço) instalado entre a mesa e o martelo (Nascimento, 2010).

Devido às suas características construtivas, é frequente nessas prensas, a ocorrência de um fenômeno denominado “REPIQUE” (repetição de golpe), devido a falhas mecânicas no sistema de acoplamento, como a quebra ou desgaste da chaveta ou do pino

“L”, relaxamento das molas, entre outros, ocasionando a descida involuntária do martelo, por uma ou mais vezes (Nascimento, 2010).

Segurança contra acionamento acidental também é imprescindível em máquinas deste tipo, tendo em vista que durante certos momentos pode ser necessário que o operador coloque alguma parte do corpo na zona de trabalho da máquina. Este tipo de segurança é compreendido por medidas que visam evitar que um equipamento seja acionado de forma involuntária, causando danos ao operador, ao ambiente ou ao próprio equipamento. Algumas dessas medidas são: uso de botões ou chaves com travas, bi comandos, etiquetas de advertência, dispositivos de bloqueio ou desbloqueio, sensores de presença ou movimento, entre outros.

Acentua-se o fato que de acordo com a NR 12 (Brasil, 2019) atualmente é proibido em todo território nacional a venda, fabricação, importação e qualquer tipo de comercialização de prensas mecânicas excêntricas ou de mecanismos similares. Assim, percebe-se a grande necessidade de adequação destas máquinas que atualmente não são consideradas seguras, a ponto de não ser permitida sua comercialização ou fabricação mesmo as que possuam adequações como as que foram desenvolvidas neste trabalho.

A NR-12 (Brasil, 2019) informa também que a adaptação deste tipo de maquinário engloba o projeto e construção de proteções fixas e/ou móveis, para mitigar possíveis riscos físicos devido ao movimento mecânico. Essas proteções são uma barreira física, evitando assim, que o trabalhador possa ter acesso à região de trabalho da máquina. O sistema ainda deve ter intertravamento elétrico, de modo que a máquina não possa ser acionada sem que as devidas proteções estejam todas fechadas e travadas conforme o projeto.

Portanto, o foco principal deste trabalho foi a adequação das máquinas de prensas mecânicas excêntricas de engate por chaveta às normas vigentes, mais especificamente a NR – 12 - SEGURANÇA NO TRABALHO EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS, atentando-se principalmente ao Anexo VIII que trata sobre “Prensas e similares”, para evitar assim, possíveis acidentes de trabalho.

2 I MATERIAL E MÉTODOS

Durante o trabalho, foi levantada todas as necessidades de adequações com base na NR 12, com estas adequações em mente, foi feito o projeto e desenhos mecânicos para execução destas alterações pelo setor de manutenção da empresa. As alterações elétricas foram elencadas e encaminhadas para o eletricista responsável.

Neste trabalho a ênfase foi dada às prensas mecânicas excêntricas de engate por chaveta, devido aos perigos já mencionados e à grande quantidade de adequações que são necessárias para cada equipamento.

As principais modificações que foram feitas em todas as prensas estão descritas a

seguir:

- De acordo com a NR12, o mecanismo de acionamento deve ser elétrico, pneumático ou hidráulico, no caso do presente estudo, a máquina possuía acionamento mecânico e foi substituído por hidráulico;
- No presente estudo, foi utilizado pedal de acionamento contra acionamento acidental, sendo recomendável também o uso de comandos bimanuais quando possível;
- Número de dispositivos de acionamento deve ser igual ao número de operadores;
- Sistema de travamento mecânico (calço) com travamento elétrico que não possibilite o acionamento da máquina sem o mesmo conectado, para utilização em casos de manutenção, troca de ferramentas, etc.;
- Proteção de todas as partes móveis (engrenagens, correias, etc.) até uma altura de 2500 mm;
- Proteção do sistema de biela martelo, contra eventuais falhas mecânicas que possam causar o desprendimento de peças;
- Sistema para acionamento e desligamento da máquina que não seja chave geral, além de botão de emergência com destravamento mecânico ou reset manual, que pare imediatamente a máquina;
- Enclausuramento mecânico da região de trabalho da prensa, ou utilização de ferramentas fechadas.

3 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

As máquinas apresentavam muitos problemas de segurança, como visto na Figura 1, que representa o tipo de máquina mais comum na empresa, uma prensa mecânica excêntrica, antes de o presente trabalho ser realizado, os locais numerados são situações em que a norma não estava sendo cumprida. As irregularidades observadas foram:

1- Sistema biela martelo desprotegido para casos de falhas;

2- Sistema de acionamento inadequado e sem sistema de emergência;

3- Zona de Prensagem exposta;

4- Equipamentos de segurança guardados em local indevido;

5- Acionamento de prensa por pedal mecânico.

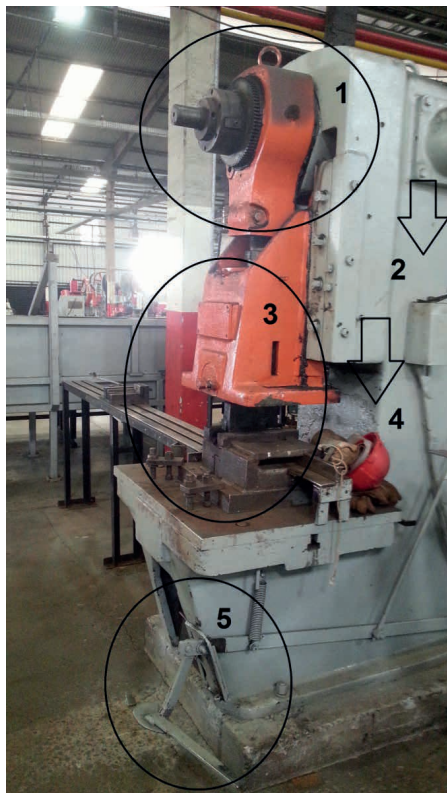



Figura 1 - Prensa mecânica antes das adequações

Fonte: Autoria Própria

Ainda é possível notar que Equipamentos de Proteção Individual e ferramentas de trabalho eram deixadas pelos funcionários na zona de trabalho da máquina, percebendo-se que além do fato do projeto da máquina não ser mais adequado às normas atuais, ainda havia uma falta grande de treinamento e conscientização dos operários quanto a segurança das máquinas, sobre o funcionamento e características próprias das PMEEC, bem como a falta de conhecimento dos procedimentos seguros quando da não utilização do maquinário da empresa.

Na figura 2, encontramos já as correções mecânicas de diversos dos problemas citados acima, como as proteções físicas do sistema de biela e martelo, enclausuramento da região de trabalho e introdução do calço mecânico.

Figura 2 – Prensas já com algumas das correções aplicadas

Fonte: Autoria Própria

Com essas adequações já prontas, foi feito um treinamento com os operadores para entenderem primeiramente o funcionamento de uma PMEEC, ou seja, quais os riscos adicionais que este tipo de máquina proporciona, posteriormente foi explicado a importância e o funcionamento seguro de todas as adequações promovidas.

Após o encerramento de minhas atividades na empresa, as modificações elétricas estavam em execução, entre elas as modificações elencadas em relatoria foram as seguintes:

- Implantação de pedal de acionamento com proteção contra acionamento acidental, (Figura 3A);
- Painel de acionamento com botão de emergência que proporciona a parada total da máquina, (Figura 3B);
- Intertravamento elétrico no calço mecânico, impossibilitando o acionamento da máquina quando este não está em sua posição adequada, (Figura 3C).

Figura 3 – Componentes elétricos a serem implantados

Fonte: Adaptações de Fletxech, 2020.

4 I CONCLUSÃO

Maquinário antigo e em desacordo com normas de segurança, não deveriam estar sendo utilizados por empresas, devido ao enorme risco à saúde e integridade de seus trabalhadores. Assim, vale destacar também o fato de ainda existirem muitas situações como a apresentada no Brasil. Isto deve-se principalmente à falta de conhecimento e de conscientização das empresas, além de provável falta de fiscalização dos órgãos competentes.

Observa-se falha por parte das empresas com relação a treinamentos e capacitações de seus funcionários. Uma capacitação adequada permite que os mesmos ao notar medidas de segurança, não as burlem para permitir uma maior produção ou uma “facilidade” na operação que possa acarretar acidentes.

O trabalho executado ressalta a necessidade de constante atualização do setor de segurança das empresas, bem como o planejamento para que as adequações necessárias sejam executadas e suas instalações estejam sempre dentro das normas de segurança vigentes.

Os fatos apresentados acentuam a importância da atuação efetiva de profissionais capacitados na área de Engenharia de Segurança do Trabalho dentro do cenário produtivo brasileiro.

REFERÊNCIAS

Brasil. Escola Nacional de Inspeção do Trabalho. Segurança e saúde no trabalho – Normatização. **NR-12 - SEGURANÇA NO TRABALHO EM MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS.** [2019]. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-12.pdf . Acesso em: 30 mar 2023

Fiergs. **Manual de Segurança em Prensas e Similares**. Porto Alegre: Conselho de Relações do Trabalho e Previdência Social, Grupo de Gestão do Ambiente de Trabalho, 2006. 134p.

Flextech. **Pedal de comando elétrico-ex**, 2020. Disponível em < https://flextechsolucoes.com.br/pedal-de-comando-eletrico-ex/> Acesso em: 13. Jan. 2022.

Nascimento, W. **Prensas mecânicas excêntricas de engate por chaveta ou acoplamento equivalente – PMEEC**, 2010. Disponível em: <https://wagner-nascimento.webnode.com.br/prensa%20mec%c3%a2nicas%20exc%c3%aantricas%20-%20pmeec%20/ https://wagner->. Acesso em: 13. Jan. 2022.

Gao, s; wang, l. **More experience might not bring more safety: Negative moderating effect of pilots' flight experience on their safety performance.** International Journal of Industrial Ergonomics, v. 95, 2023.

Sankaranarayanan, R., Surrendar, N., Rajesh Jesudoss Hyness, N. **Design and fabrication of motor holding device for the prevention of unsafe working conditions in heat setting machines of textile industries.** Materialstoday: PROCEEDINGS, v. 65, pg. 3431-3436, 2022.

Xuecai, X., Xuemining, S., Gui, F., Shifei, S., Qingsong, J., Jun, H., Zhirong, W. **Accident causes data-driven coal and gas outburst accidents prevention: Application of data mining and machine learning in accident path mining and accident case-based deduction**. Process Safety and Environmental Protection, v. 162, p. 891-913, 2022.

CAPÍTULO 2

ANALISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E MICROESTRUTURAIS DO AÇO INOX DUPLEX SUBMETIDO A PROCESSOS DE SOLDAGEM

Data de aceite: 02/05/2023

Simoni Maria Gheno

RESUMO: A ampla utilização do aço inoxidável duplex se deve especialmente a combinação de excelentes propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão. Nesse trabalho estudou-se as propriedades mecânicas e as fases microestruturais do aço inoxidável duplex após os processos de soldagem: eletrodo revestido (*SMAW)*, *Metal Inert* Gás (*MIG)* e Tungstênio Inert Gás (TIG). Em seguida ao processo de soldagem, o material era submetido ao tratamento térmico a uma temperatura de 475 ^{0}C. As microestruturas foram analisadas com ataque Behara, para verificação de precipitação nas temperaturas próximas de 475 ^{0}C e posteriormente realizado o ensaio de microdureza *Vickers*. Observou-se um pequeno aumento de dureza nos corpos de prova especificamente na região de soldagem, porém observou-se também a presença da precipitação da fase α'. Em relação aos processos de soldagem adotados, eles mostraram que ao longo do processo, a estrutura do material apresentou o defeito de falta de fusão que foi mais bem caracterizado após análise de microscopia óptica feita com o objetivo de quantificar e verificar os defeitos apresentados nas amostras. Todas as amostras analisadas apresentaram o defeito de falta de fusão, apesar da falta de penetração obtida em todas as amostras. Em todas elas fica evidente a ausência de trincas, mordeduras e sobreposição, mostrando que todos os processos podem ser eficazes no aço inox duplex.

PALAVRAS-CHAVE: Aço Inoxidável. Soldagem. Caracterização.

ABSTRACT: The wide use of duplex stainless steel is especially due to the combination of excellent mechanical properties and high corrosion resistance. In this work we studied the mechanical properties and microstructural phases of duplex stainless steel after welding processes: Coated electrode (SMAW), Metal Inert gas (MIG) and tungsten Inert gas (TIG). After the welding process, the material was subjected to heat treatment at a temperature of 475 ^{0} C. The microstructures were analyzed with Behara attack, to check for precipitation at temperatures close to 475 ^{0} C and subsequently performed the Vickers microhardness assay. There was a small increase of hardness in the specimens

specifically in the welding region, but the presence of the precipitation of the α phase was also observed. In relation to the welding processes adopted, they showed that throughout the process, the structure of the material presented the defect of lack of fusion that was best characterized after optical microscopy analysis made with the objective of quantifying and verifying the Defects presented in the samples. All the samples analyzed presented the defect of lack of fusion, despite the lack of penetration obtained in all samples. In all of them it is evident the absence of cracks, bites and overlap, showing that all processes can be effective in duplex stainless steel.

1 I INTRODUÇÃO

As jazidas de petróleo em território nacional sobretudo as da camada pré-sal vêm colocando em discussão quais os métodos e as tecnologias mais eficientes para explorá-las. Neste âmbito, existe inúmeros equipamentos e máquinas industriais que são submetidos a ambientes agressivos e condições severas de trabalho, o que gera um desgaste excessivo de componentes e, consequentemente, muitas manutenções. Adicionalmente, também há o setor de produção sucroalcooleira (açúcar, álcool e energia) que necessita de inovação tecnológica e pesquisa aplicada para atender ao crescimento exponencial do setor nos últimos anos, bem como aos requisitos técnicos para a exportação dos produtos. Desta forma, o desenvolvimento tecnológico exige demanda cada vez maior de processos tecnológicos que solucionem os problemas reais. Nessa categoria de aplicação de materiais estão os aços inoxidáveis dúplex (AID). (ABINOX, 2016),

Os aços inoxidáveis duplex (AID) foram desenvolvidos no ano de 1927 e se tornaram comercialmente disponíveis na produção industrial e pesquisa realizada na Suécia, França e Estados Unidos (NILSSON, 1992; MATEO et al., 2001). Desde então, estas ligas têm sofrido inúmeras modificações que vão desde a sua composição, até as tecnologias usadas na sua produção. Os AID modernos possuem uma excelente resistência a corrosão e boas propriedades mecânicas, combinação que tem impulsionado o seu uso, cada vez mais, em ambientes altamente agressivos. São geralmente processados através do sistema da técnica de descaburação por sopro combinado de oxigênio e argônio (AOD) que faz com que o aço apresente baixo teor de carbono (SEDRIKS, 1996).

O AID é uma liga formada por cerca de 18% a 30% de Cr, 1,5% a 4,5% de Mo mais elementos formadores e estabilizantes da austenita, essencialmente o níquel e o nitrogênio, de modo a formar uma microestrutura composta de partes aproximadamente iguais de ferrita e austenita, quando em temperatura ambiente. Estes aços são magnéticos e a estrutura ferrítica conferem-lhes uma elevada resistência a corrosão enquanto a estrutura austenítica proporciona elevada resistência mecânica e boa soldabilidade. (LIMA, 2006).

Os AIDs são ligas fundamentadas no sistema Fe-Cr-Ní-Mo-N na faixa de composição: 18,5% a 27% de Cr; 4% a 8% de Ni; 2% a 4% Mo; C menor do que 0,08% e também podem conter Cu. A sua microestrutura bifásica ferrita-austenita é determinada

principalmente pelos teores de Fe, Cr e Ni (SEDRIKS, 1996). Esse aço é muito influenciado pela velocidade de resfriamento e do tempo de manutenção da temperatura, podendo, assim, obter outras fases a não ser a ferrita e austenita, ocasionando a fragilização destes aços. As temperaturas que fragilizam esse aço podem ser divididas em duas faixas: fragilização a baixa temperatura, na qual ocorre em uma faixa de temperatura de 300°C a 500°C, e fragilização a alta temperatura, na qual ocorre em uma faixa de temperatura de 600°C a 1000°C (NILSON, 1992; WELLS, 1952; CHARLES, 1997).

Nos AIDs a resistência a corrosão é semelhante aos aços inoxidáveis austeníticos, no entanto com melhores propriedades mecânicas. As propriedades de resistência a corrosão são melhoradas devido a menor presença de níquel, tornando-os mais moderados a crescente tendência de aços mais ligados com nitrogênio, estabilizando assim a fase austenítica e diminuindo a partição do cromo na ferrita (LIMA, 2006).

Uma particularidade dos AID que merece cuidados é o fator precipitação. Ao submeter os AIDs a uma temperatura de 425°C a 525°C, acontece a formação da fase α' por meio da decomposição espinodal. A transformação é mais rápida a temperatura de 475°C (ALBUQUERQUE et al., 2010). A fase α' rica em cromo e a fase α rica em ferro podem ser verificadas após o envelhecimento da ferrita a temperaturas abaixo de 475°C (MAGNABOSCO, 2004). A presença da fase α' em forma de partículas muito pequenas disseminadas na ferrita original causa endurecimento nos AIDs. Portanto o surgimento da fase α' é comprovado pelo acréscimo de dureza e consequentemente pelo decréscimo da tenacidade com o aumento dos tempos de envelhecimento a temperatura de 475° (SOLOMON; DEVINE JUNIOR, 1982; 1984). Depois de grandes períodos em temperaturas baixas, cerca de 300°C a fase α' também pode ser verificada. (SANTOS, 2008).

2 | PROCESSOS DE SOLDAGEM

A soldagem envolve muitos fenômenos metalúrgicos como, por exemplo, fusão, solidificação, transformações no estado sólido, deformações causadas pelo calor e tensões de contração, que podem causar muitos problemas práticos. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1982; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005).

Um fenômeno que pode acontecer no processo de soldagem é a repartição térmica que ocorre onde a temperatura varia desde a zona de fusão até o metal base, mais especificamente nos ciclos térmicos de soldagem. Os efeitos dos ciclos térmicos de soldagem podem dificultar que as fases austenita e ferrita presentes nos AIDs sejam mantidas após o processo de soldagem. Na soldagem de AID, a microestrutura varia desde a poça de fusão até o metal base e a microestrutura final depende da velocidade de resfriamento a partir de cada temperatura máxima presente na repartição térmica. Diversos fatores podem influenciar as propriedades da solda, são eles: a composição química, o procedimento, o processo de soldagem e o balanço entre a austenita e a ferrita presentes

na microestrutura. Alterações na composição química e o controle da temperatura durante a soldagem podem ajustar o balanço entre a austenita e a ferrita. (LIMA, 2006).

A escolha do processo de soldagem envolve basicamente quatro fatores: projeto da junta, espessura do material, natureza do material a ser soldado e o custo de fabricação. (WAINER; BRANDI; MELLO, 1982; MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2005). Entre os vários processos de soldagem existentes o mais amplamente utilizado é a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido, o *Shielded Metal Arc Welding (SMAW).* O calor produzido pelo arco funde a alma do eletrodo, o revestimento e o metal base. Através do arco as gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão, os gases produzidos durante a decomposição do revestimento as protegem da atmosfera.

Na soldagem a arco elétrico com gás de proteção, o *Gas Metal Arc Welding (GMAW*), também conhecida como soldagem *Metal Inert Gas (MIG) e Metal Active Gas (MAG)* – MIG/MAG, o arco funde de maneira ininterrupta o arame à medida que este é alimentado à poça de fusão. A ação protetora contra a atmosfera é realizada pelo fluxo de um gás inerte (argônio ou hélio), ativo (dióxido de carbono) ou a mistura dos dois.

O processo de soldagem TIG - *Gas Tungsten Arc Welding (GTAW*) é um processo de soldagem que utiliza um arco elétrico entre um eletrodo não consumível de tungstênio e a poça de soldagem. (BRACARENSE, 2000).

A produção da maioria de equipamentos e máquinas utilizados tanto na indústria petroquímica quanto na sucroalcooleira e de energia envolve o uso de processos de soldagem e, durante o processo de soldagem a junta soldada experimenta diferentes valores de temperatura e tempos de resfriamento, o que pode afetar as características microestruturais tanto do cordão de solda quanto do metal-base. Sendo assim, é necessário conhecer como os processos de soldagem influenciam o comportamento da junta soldada, quais processos são mais adequados.

Nesse sentido, o objetivo deste estudo foi investigar as propriedades mecânicas e microestruturais do aço inoxidável duplex, submetido aos processos de soldagem: Arco Elétrico com Eletrodo Revestido, MIG/MAG e TIG. Para alcançar esse objetivo, neste trabalho verificamos os seguintes parâmetros: (i) análise química do material base, (ii) identificação através das microestruturas possíveis falhas e defeitos obtidos nos processos de soldagem, (iii) influência do processo de soldagem na dureza, (iv) Influência do tratamento térmico de precipitação por envelhecimento no cordão de solda e no material base.

3 | PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os procedimentos metodológicos adotados para esta pesquisa foram: pesquisa bibliográfica, documental, laboratorial e aplicada. A pesquisa bibliográfica foi elaborada a partir de material já publicado sobre o assunto, por meio de livros, artigos, dissertações e teses. Na pesquisa documental utilizou-se as normas ASTM E384-89 e ABNT NBR ISO

6892-1:2013, pois é o tipo de pesquisa que se destaca no momento em que podemos organizar informações, conferindo-lhe uma nova importância como fonte de consulta. A pesquisa laboratorial teve o objetivo de demonstrar como e por que determinado fato é produzido e caracteriza-se por manipular diretamente as variáveis relacionadas com o objeto de estudo. É, ainda, caracterizada como pesquisa aplicada, pois procura produzir conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. (PRODANOV; FREITAS, 2013).

3.1 Materiais e métodos

O material utilizado é o aço inoxidável duplex, fornecido pela empresa Engenharia e Materiais LTDA (ENGEMASA), na forma de barras cilíndricas, com aproximadamente 25mm de diâmetro e 250mm de comprimento. A análise química foi feita utilizando um espectrômetro de massas – Marca Termo *Scientific*– modelo LTQ. O ensaio foi realizado na Universidade de São Paulo, no Instituto de Química de São Carlos.

Os dois corpos de prova foram confeccionados a partir das barras cilíndricas que foram submetidas ao processo de torneamento cilíndrico, utilizando o torno mecânico da marca ROMI, modelo Tormax 20, do laboratório de máquinas operatrizes da Universidade Paulista (UNIP) de Ribeirão Preto/SP.

Durante o processo de torneamento cilíndrico houve uma grande preocupação com o aquecimento do material para que não alterasse sua microestrutura, sendo assim, utilizou-se a menor velocidade disponível no torno e uma grande refrigeração com óleo solúvel. A finalidade deste processo é retirar os óxidos presentes na superfície do material. Em seguida os corpos de prova foram preparados conforme o tipo de análise necessária. Para os processos de soldagem os corpos de prova foram cortados com a espessura de 5mm utilizando o processo de sangramento radial no mesmo torno do processo anterior e tomando os mesmos cuidados com o aquecimento. Posteriormente, os corpos de prova foram cortados ao meio, em seu sentido axial para facilitar o processo de confecção das amostras e das juntas de soldagem. O processo de lixamento foi utilizado para a fabricação das juntas de soldagem. Elas foram concebidas nos dois lados dos corpos de prova com o ângulo de aproximadamente 45°.

3.2 Processos de soldagem

Os processos de soldagem aplicados aos corpos de prova de aço inox foram o Eletrodo Revestido, MIG e TIG, ambos do Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP). Os corpos de prova foram soldados com junta de topo e os cordões de solda foram feitos através de um único passe com a espessura de aproximadamente 2mm.

O processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido foi realizado utilizando o eletrodo AWS E 309 L – 10 com os parâmetros de soldagem: 65,9 Volts e 52 Amperes. A máquina de solda utilizada no processo é da marca CASTOLIN EUTECTIC,

modelo DPT 350 HD,

O processo de soldagem MIG o eletrodo foi realizado com o uso do AWS A5.9 ER308 LSi juntamente com o gás de proteção, cuja composição química é 75% argônio e 25% dióxido de carbono. Os parâmetros de soldagem empregados foram: 26,8 Volts e 116 Amperes. A máquina de solda utilizada no processo é da marca CASTOLIN EUTECTIC, modelo ARCWELD 400S.

O processo de soldagem TIG foi realizado com a utilização do metal de adição AWS A5.9 ER308 LSi, sendo a proteção gasosa feita com argônio industrial. A corrente elétrica empregada durante a soldagem foi 90 Amperes. A máquina de solda utilizada no processo foi a mesma do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido.

O tratamento térmico foi realizado em forno pré-aquecido a temperatura de 475°C durante o tempo de 1 hora, para que a temperatura do forno pudesse estabilizar e posteriormente resfriados em água a temperatura ambiente. O tratamento térmico foi realizado com o Forno do tipo Mufla digital com temperatura máxima de 1200°C, da marca QUIMIS, do laboratório de metalografia da Universidade Paulista (UNIP) de Ribeirão Preto/SP.

3.3 Análise microestrutural

Após os corpos de prova terem passados pelos seus respectivos processos de soldagem e tratamento térmico, foram embutidos com baquelite a quente e lixados e polidos em alumina de 1μm. Em seguida, as amostras foram colocadas no ultrassom por 5 minutos. Para a revelação das fases pertencentes a microestrutura foi utilizado o reativo de Behara. A caracterização microestrutural foi realizada através de microscópio óptico da marca AXIO, com registro fotográfico via computador e ampliação de até 1000x, do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC-USP. Também foram feitas imagens com a ampliação de 200 vezes em lente objetiva de cada região de soldagem em particular: zona fundida, zona termicamente afetada e metal de base.

3.4 Ensaios

A análise da microdureza *Vickers* nos corpos de prova foram realizadas de forma que o processo de medição começasse na zona fundida, passasse pela zona termicamente afetada e entrasse no metal de base. Foi utilizada uma carga de 0,3Kg durante o tempo de 15 segundos e dado um espaçamento entre cada impressão do ensaio de 0,25mm. Os ensaios de dureza foram realizados na escala *Vickers*, de acordo com a norma ASTM E384-89 "Standard test methods for microhardness of metarials". O microdurômetro utilizado é da marca LEICA, modelo VMHT MOT, existente no laboratório do Departamento de Engenharia de Materiais da EESC-USP. Os resultados das medições foram plotados em gráficos, para que se possa identificar as variações de microdureza.

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ABNT NBR ISO 6892-1:2013 com velocidade de ensaio de 1mm por minuto. A máquina utilizada no ensaio é da marca

TIMEGROUP, modelo WDW100EB, com capacidade máxima de 100KN, da Faculdade de Tecnologia de Sertãozinho (FATEC).

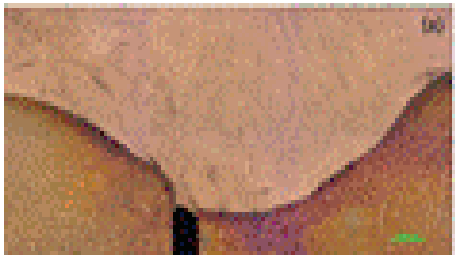
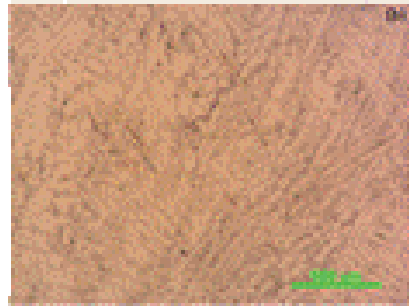
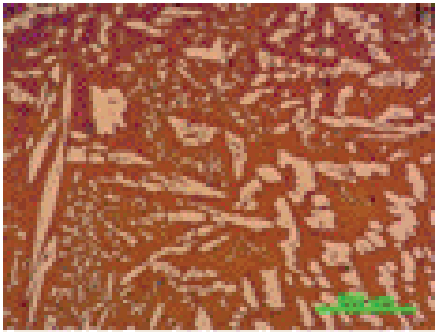
4 I RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise química do AID obtidos por Espectroscopia de Massa estão apresentados na Tabela 1 mostrando resultado padrão esperado para o aço inox. Os resultados mostram que se trata de um aço inoxidável duplex de classe mais econômica. Isso foi possível graças à ausência de Mo na composição química do aço em estudo. Essa classe de aço pode substituir os graus austeniticos dos aços AISI 304 e AISI 316. (WELLS, 1952). Possui, também, elevado teor de Cr, o que estabiliza o PRE e diminui a tenacidade do material, sendo o principal elemento para a resistência a corrosão.

Elemento	Composição (%)
Fe	67,81
Cr	24,9
Ni	5,71
Mn	0,68
Si	0,83
C	0,051
P	0,022
S	0,002

Tabela 1 - Composição química (porcentagens em peso) para o AID obtida por Espectroscopia de Massa

Fonte: elaborada pelos autores

A caracterização microestrutural das amostras de todos os processos de soldagem estão apresentadas na Figura 1, que mostra as imagens do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido não tratado.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 1 - Microestruturas das amostras soldadas pelo processo a arco elétrico com eletrodo revestido: Panorâmica do Cordão de Solda/ Metal base (50x objetiva); b- Cordão de Solda (200x objetiva); c- Zona Termicamente Afetada (200x objetiva); d- Metal Base (200x objetiva). Ataque: Behara modificado

Fonte: imagens emitidas por microscopia ótica durante a realização da pesquisa

A Figura 2 mostra as imagens do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido tratado termicamente.

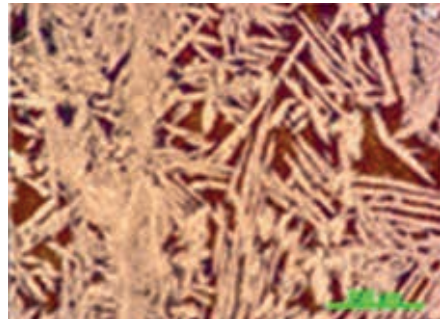
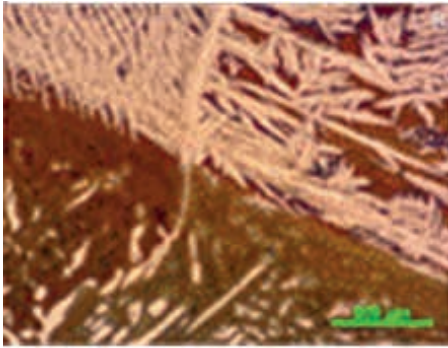
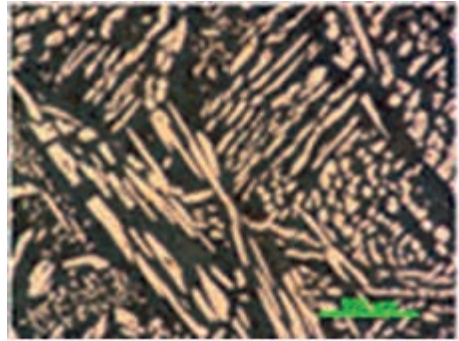
(a)

(b)

(c) (d)

Figura 2 - Microestrutura da amostra soldada pelo processo a arco elétrico com eletrodo revestido tratado termicamente: a- Panorâmica do Cordão de Solda/ Metal base (50x objetiva); b - Cordão de Solda (200x objetiva; c - Zona termicamente afetada (200xObjetiva); 2d - Metal Base (200x objetiva). Ataque: Behara modificado

Fonte: imagens emitidas por microscopia ótica durante a realização da pesquisa

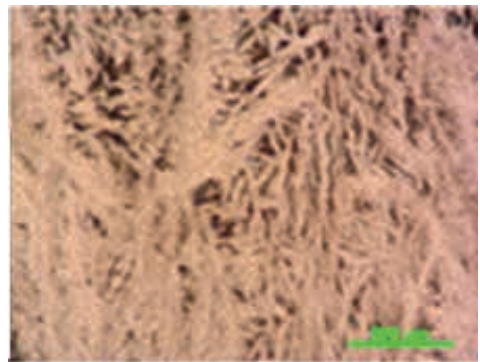
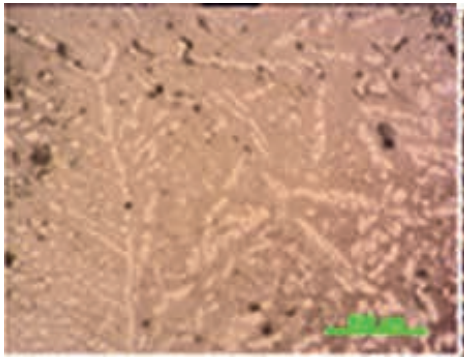
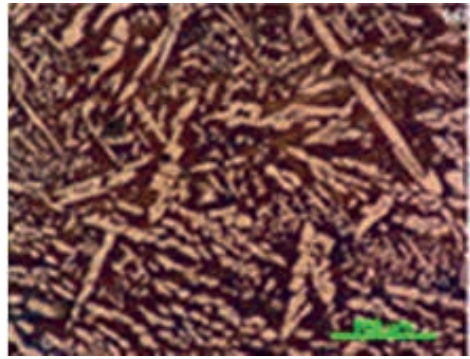
As Figura 3 e 4 tratam das imagens microestruturais referentes ao processo de soldagem MIG no corpo de prova do AID. A Figura 3 apresenta a microestrutura do corpo de prova do AID sem tratamento térmico enquanto a Figura 4 mostra a microestrutura dele após tratado termicamente.

(a) (b)

(c) (d)

Figura 3 - Microestrutura da amostra soldada pelo processo MIG, não tratado: a - Panorâmica do Cordão de Solda/ Metal base (50x objetiva); b- Cordão de Solda (200x objetiva); c- Zona Termicamente Afetada (200x objetiva); d - Metal Base (200x objetiva). Ataque: Behara modificado

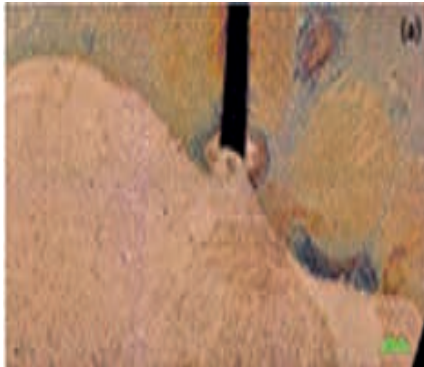
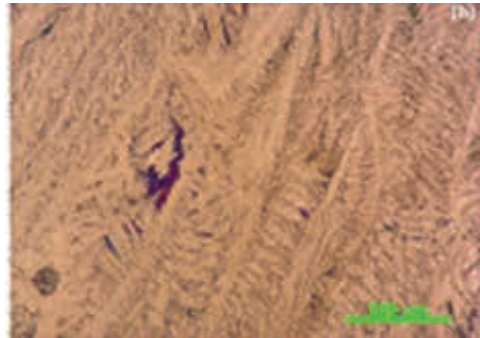
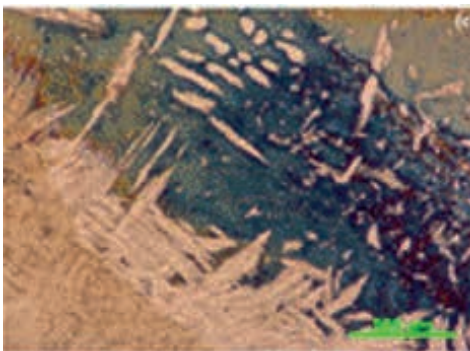
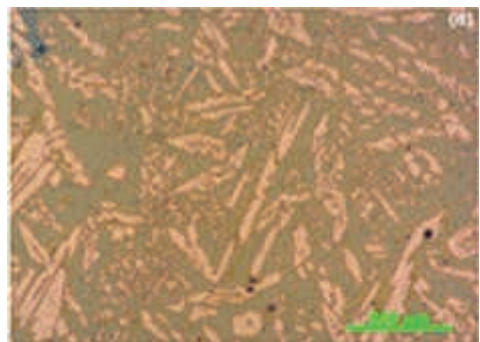
Fonte: imagens emitidas por microscopia ótica durante a realização da pesquisa

(a) (b)

(c) (d)

Figura 4: Microestrutura da amostra soldada pelo processo MIG, tratado termicamente: a - Panorâmica do Cordão de Solda/Metal base (50x objetiva); b - Cordão de Solda (200x objetiva); c-Zona Termicamente Afetada (200x objetiva); d - Metal Base (200x objetiva). Ataque: Behara modificado

Fonte: imagens emitidas por microscopia ótica durante a realização da pesquisa

A Figura 5 apresentadas as imagens do processo de soldagem TIG no corpo de prova do AID não tratado termicamente e a Figura 6 mostra as imagens microestruturais após o processo de soldagem TIG tratado termicamente.

(a)

(b)

(c)

(d)

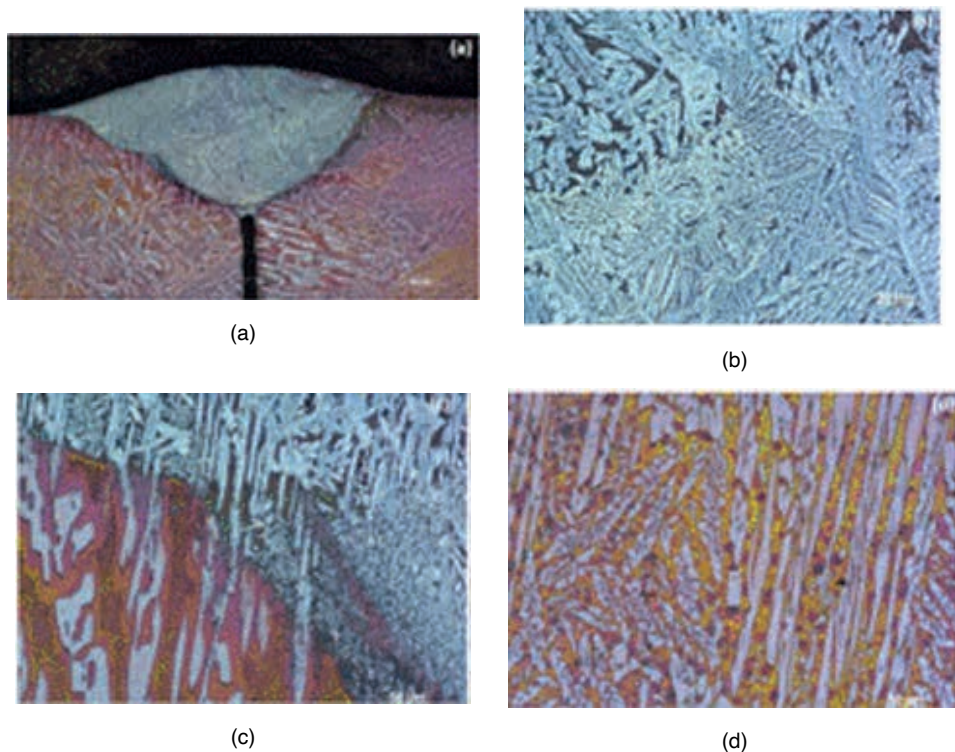



Figura 5: Microestrutura da amostra soldada pelo processo TIG, não tratado: a- Panorâmica do Cordão de solda/ Metal base (50x objetiva); b- Cordão de Solda (200x objetiva); c-Zona Termicamente Afetada (200x objetiva); d- Metal Base (200x objetiva). Ataque: Behara modificado

Fonte: imagens emitidas por microscopia ótica durante a realização da pesquisa

(a)

(b)

(c) (d)

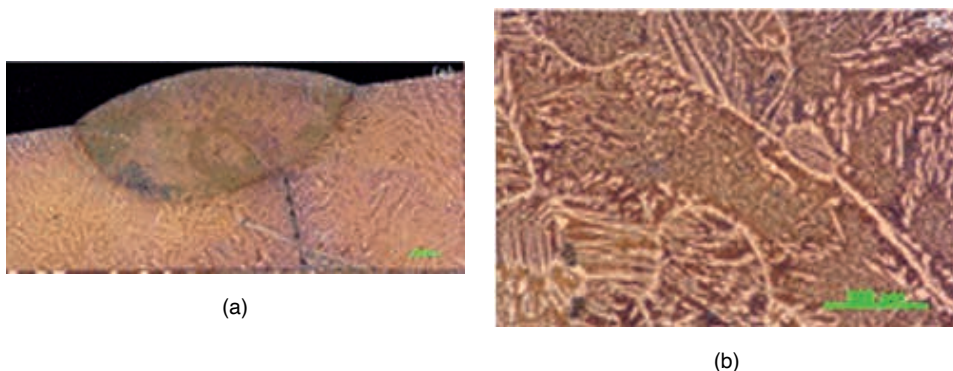
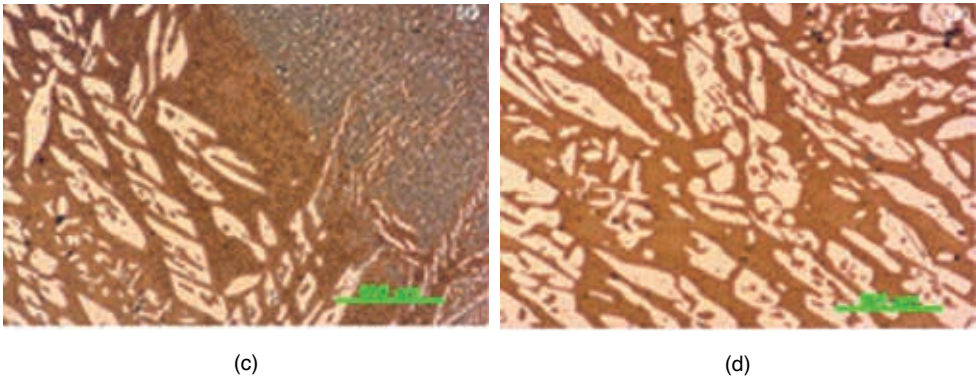



Figura 6: Microestrutura da amostra soldada pelo processo TIG tratado termicamente: a- Panorâmica do Cordão de Solda/ Metal base (50x objetiva); b- Cordão de Solda (200x objetiva); c- Zona Termicamente Afetada (200x objetiva); d- Metal Base (200x objetiva). Ataque: Behara modificado

Fonte: imagens emitidas por microscopia ótica durante a realização da pesquisa

A caracterização microestrutural tornou possível analisar os defeitos apresentados nas zonas fundidas, zonas termicamente afetadas e metal base de todos os cordões de solda, tal como apresenta a literatura (BRACARENSE, 2000; CALLISTER, 2014). Em todas as amostras houve falta de fusão e penetração do cordão de solda, devido aos parâmetros utilizados nos processos de soldagem. Também foi constatada a presença de poros em todas as amostras, porém não é possível correlacionar sua causa diretamente com os processos de soldagem, pois existe uma quantidade relativa de poros no metal base, possivelmente gerados na manufatura do material. Em ambos os processos de soldagem não ocorreu a presença de trincas, mordeduras e sobreposição.

Diferentes tamanhos de grãos podem ser observados nos cordões de solda e no metal base das amostras. Isso ocorreu devido a composição química do metal de adição ser diferente do metal base, porém, mesmo a composição sendo diferente é o que indicam as normas de soldagem. Através das microestruturas foi possível observar que o processo TIG apresenta uma microestrutura mais homogênea, sendo então, o processo que melhor se sobressaiu, porém, a escolha do processo de soldagem depende da aplicação da junta soldada mostrando resultados coerentes com o que apresenta a literatura (BORSATO, 2001).

Os ensaios de microdureza *Vickers* foram realizados com o objetivo de detectar possíveis variações de dureza decorrentes do processo de soldagem e tratamento térmico e foram realizados partindo-se do centro do cordão de solda até alcançar o metal base. A Tabela 2 mostra os valores médios obtidos no ensaio de microdureza *Vickers*, para todos os processos na condição de não tratados e tratados termicamente. É possível observar na Tabela 2, que no processo de soldagem com eletrodo revestido houve um aumento de dureza significativo, subindo de 183 para 238. O mesmo foi notado no processo de

soldagem MIG, porém a diferença é menos expressiva, sendo que o valor subiu de 253 para 295. Esse aumento de dureza ocorreu devido ao surgimento da fase α' durante os processos de soldagem. O contrário foi observado no processo de soldagem TIG, uma vez que a dureza média diminuiu de 272 para 267, porém o valor da redução é insignificante, mostrando que não aconteceu nenhuma mudança de fase no processo.

Processos de Soldagem	Não tratados (HV 0,3)	Tratados termicamente (HV 0,3)
Eletrodo Revestido	183	238
MIG	253	295
TIG	272	267

Tabela 2 - Valores médios obtidos no ensaio de microdureza Vickers para cada processo de soldagem na condição de não tratados e tratados termicamente.

Fonte: elaborada pelos autores

O ensaio de tração foi realizado com o intuito de verificar se houve mudanças no limite de escoamento e tensão de resistência nos corpos de prova após o processo de tratamento térmico de precipitação por envelhecimento. A Tabela 3 mostra os resultados obtidos no ensaio de tração com os corpos de prova não tratados e tratados termicamente. Verificou-se um aumento significativo do limite de escoamento, bem como da tensão de resistência do material após o processo de tratamento térmico de precipitação por envelhecimento; esse aumento foi provocado devido ao surgimento da fase α', que aumenta a dureza do material e, consequentemente, sua resistência mecânica.

Corpos de Prova	Limite de Escoamento (MPa)	Tensão de Resistência (MPa)	Força Máxima (KN)
Corpos de prova não tratados			
1	608,69	765,98	21,66
2	667,41	769,28	21,75
Média	638,05	767,63	21,71
Corpos de prova tratados termicamente			
1	689,96	863,9	23,62
2	640,22	790,31	22,72
Média	665,09	827,11	23,17

Tabela 3 - Resultados obtidos no ensaio de tração

Fonte: elaborada pelos autores

5 I CONCLUSÕES

Na espectroscopia de massa foi possível verificar que o material estudado se trata de um aço inoxidável duplex de classe mais econômica, que pode substituir os graus austeniticos dos aços AISI 304 e AISI 316. Em ambos os processos de soldagem não ocorreu a presença de trincas, mordeduras e sobreposição. Foi possível observar que o processo TIG apresenta uma microestrutura mais homogênea, sendo então o processo que melhor se sobressaiu. O aumento de dureza detectados nas amostras soldadas e o aumento de resistência mecânica ocorrido no ensaio de tração deve-se ao surgimento da fase α' durante os processos de soldagem e tratamento térmico.

Os processos de soldagem se mostraram eficientes e podem ser utilizados na manutenção de equipamentos utilizados pelas indústrias sucroalcooleiras e de extração de petróleo. Pode-se também, futuramente, realizar estudos voltados para a investigação de cada microestrutura presente nos cordões de solda dos processos de soldagem descritos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 6892-1**: Ensaio de Tração. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASTM. Standard Test Method for Microhardness of Materials. **ASTM E384**, 1989.

ALBUQUERQUE, V. H. C.; SILVA, E. M.; LEITE, J. P.; MOURA, E. P.; FREITAS, V. L. A.; TAVARES, J. M. R. S. Spinodal decomposition mechanism study on the duplex stainless steel UNS S31803 using ultrasonic speed measurements**. Materials and Design Elsevie**r. v.31, p. 2147-2150, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO AÇO INOX (ABINOX). **Coletânea de Informações Técnicas–Aço Inoxidável**. Disponível em: http://www.abinox.org.brupfilesarquivosbibliotecatipos-de-acos-inoxidaveis.pdf . Acesso em: 3 out. 2016.

BORSATO, K. S. **Caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas de chapas espessas de aço inoxidável duplex UNS S31803, submetido a ciclos térmicos de soldagem**. Tese de D.Sc., PPGEM/UFSC, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, 2001.

BRACARENSE, A. Q., **Processo de Soldagem TIG – GTAW**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2000.

CALLISTER, W. D. J., **Fundamentos da ciência e engenharia de materiais**: uma Abordagem Integrada. 4. Ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014.

CHARLES, J., Why and Where duplex stainless steel, In: **Conference Duplex Stainlesssteels. Proceedings**. The Netherlands. p. 29-42, The Netherlands, 1997.

LIMA, D. B. P. L., **Avaliação da Soldabilidade do Aço Inoxidável Superduplex UNS S32750**. Dissertação de Mestrado, DEM/UFPR, Curitiba, Paraná, Brasil, 2006.

MAGNABOSCO, R., Magalhães, M. Formação de fase sigma após rápido envelhecimento entre 700 C e 900 C do aço inoxidável dúplex UNS S31803 (SAF 2205). In: **59°Congresso Internacional Anual da ABM**. p. 2758-2767, São Paulo: ABM, 2004.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A. Q. **SOLDAGEM**: fundamentos e Tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005.

MATEO, A., GIRONES, A., KEICHEL, J., LLANES, L., AKDUT, N., ANGLADA, M., Cyclic deformation behavior of superduplex stainless steels. **Materials Science and Engineering A314**, p. 176-185, 2001.

NILSSON, J. O. Super Duplex stainless steels. **Materials Science and Technology**. v. 8, n. 8, p. 685-700, 1992.

SANTOS, F.S. **Espectroscopia de Fotoelétrons (Xps) no Estudo de Filmes Passivos sobre Aços Inoxidáveis Envelhecidos em Baixas Temperaturas**. Dissertação de Mestrado, DEMa/UFSCar, São Carlos, São Paulo, Brasil, 2008.

SEDRIKS, A. J., **Corrosion of stainless steels**. 2 ed. New York, John Wiley & Sons, 1996.

SOLOMON, H. D.; DEVINE JUNIOR, T. M. **Duplex Stainless Steels** – A tale of two phases, Proceedings Metals Park: ASM, p. 693-756, 1982.

______. Duplex stainless steels – a tale of two phases. In: **Conference Du-plex Stainless Steels Proceedings**. p. 693-757, Ohio, 1984.

WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F.D.H. **Soldagem** - Processos e Metalurgia, ABS Editora, 1992.

WELLS, A. A. Heat flow in welding. **Welding Journal,** v. 31, n. 5, pp. 263-267, 1952.

CAPÍTULO 3

AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO PROCESSO DE SOLDAGEM GMAW CMT PARA MANUFATURA ADITIVA DE LIGA DE TITÂNIO TI-6AL-4V

Data de aceite: 02/05/2023

Oksana Kovalenko
Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia

RESUMO*:* O processo MIG/MAG com modo operacional CMT é frequentemente usado para manufatura aditiva por deposição a arco de vários materiais, incluindo ligas de aço ao carbono, aço inoxidável e alumínio. No entanto, seu uso para ligas de titânio é pouco comum, uma vez que tradicionalmente utiliza-se processos com alimentação externa de arames, como TIG e PAW. Processo MIG/MAG pode apresentar tais dificuldades como transferência metálica irregular, instabilidade de arco e alta taxa de geração de respingos, altamente indesejáveis durante a deposição. Este estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modo operacional CMT para a confecção de pré-formas de liga de titânio por manufatura aditiva. Para isso, realizou-se a deposição de uma parede usando o modo operacional CMT, com linha sinérgica própria para a liga de titânio Ti-6Al-4V, deposição no sentido bidirecional e gás de proteção de Ar+25%He, além de proteção auxiliar por meio de trailing gas. A parede depositada foi avaliada por meio de oscilogramas de corrente e tensão, aspecto visual, geométrico e macroestrutura. Os resultados indicaram que o modo operacional CMT apresenta as características suficientes para a confecção de pré-formas de liga de titânio por manufatura aditiva.

PALAVRAS-CHAVE: GMAW, CMT, Manufatura Aditiva, Titânio.

PRELIMINARY EVALUATION OF GMAW CMT WELDING PROCESS FOR ADDITIVE MANUFACTURING OF TI-6AL-4V TITANIUM ALLOY

ABSTRACT*:* The MIG/MAG process with CMT operating mode has been applied to additive manufacturing by arc deposition of various materials, such as carbon steel alloys, stainless steel alloys, and aluminum. However, there are few reports of its use for titanium alloys. Traditionally, external wire feeding processes such as TIG and PAW are used for titanium alloys due to the MIG/MAG process's difficulties with irregular metal transfer, arc instability, and high spatter generation rate. This study aims to evaluate the applicability of the CMT operating mode for the additive manufacturing of titanium

alloy preforms. To achieve this, a wall deposition was performed using the CMT operating mode, with a synergic line for the Ti-6Al-4V titanium alloy, bidirectional deposition, Ar+25%He shielding gas, and auxiliary protection via trailing gas. The deposited wall was evaluated using current and voltage oscillograms, visual, geometric, and macrostructure analysis. The results showed that the CMT operating mode has the sufficient characteristics for the additive manufacturing of titanium alloy preforms.
KEYWORDS: GMAW, CMT, Additive Manufacturing, Titanium.

1 | INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a maneira de se fabricar produtos tem se modificado. Para se manterem competitivos, os fabricantes têm procurado produzir com mais qualidade, mas sempre buscando concomitantemente reduzir os tempos e os custos de produção. Nesta linha se enquadra a chamada manufatura aditiva.

Em manufatura aditiva peças são construídas utilizando-se diversas tecnologias de adição de material com alto grau de automação. A sequência das etapas típicas de procedimento de manufatura são: geração do modelo 3D em CAD; arquivamento do modelo em CAD em um formato compatível para a máquina de manufatura aditiva, por exemplo STL, SLC, CLI, RPI, LEAF, LMI, HPGL; preparação da estrutura de suporte (plataforma, substrato ou base de construção plana); fatiamento do arquivo em camadas; a peça é matematicamente seccionada por *software* em camadas paralelas e/ou horizontais; geração das coordenadas que utilizadas para fabricação da peça; determinação da trajetória do material a ser depositado ou foco do fonte de calor que, desloca-se pelo eixos X e Y; construção do protótipo camada por camada; operações de acabamento (retirada do suporte e usinagem) (Lira, 2008).

Os processos de manufatura aditiva surgiram como possíveis soluções para atender requisitos de qualidade, de tempo de produção e de economia de recursos (matéria prima). Deve ser dito, entretanto, que a fabricação através de manufatura aditiva pode não livrar o produto final de etapas de usinagem posteriores, mas sua diminuição significativa é sempre presente (usinagem apenas para desbaste fino e acabamento estético e dimensional). Esta tecnologia tem encontrado aplicação em várias áreas, como médica (próteses dentárias, implantes, coroas e próteses de partes de ossos), na área aeroespacial, automobilística, química, óleo e petróleo, etc. (motores, rotores e pás, bombas, etc.). A maior contribuição da manufatura aditiva, com destaque para o setor aeroespacial, é a maior liberdade em criação de projetos das peças, permitindo desenvolver as peças inovadoras, que dificilmente poderiam ser produzidas pela fabricação tradicional. O potencial da manufatura aditiva se deve ainda aos fatores como redução ou eliminação das matrizes e suportes; facilidade em modificar o produto a partir de modificações de projeto simplesmente mudando parâmetros e trajetórias em softwares; facilidade em testar novos materiais (protótipos) de maneira mais rápida e econômica, sem necessidade de investir em ferramentas específicos.

De acordo com Ding *et al*. (2014) os processos tipicamente concebidos na área de soldagem a arco tais como MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*), TIG (*Tungsten Inert Gas*), ou PAW (*Plasma Arc Welding)* estão amplamente empregados para a manufatura aditiva. Sequeira Almeida e Williams (2010) apresentaram a WAAM (*Wire and Arc Additive Manufacturing*) para indústria aeroespacial como única solução de baixo custo para produção de componentes estruturais de grande escala. Nesse sentido, o modo operacional CMT (*Cold Metal Transfer*) tem um grande potencial para ser aplicado à manufatura aditiva devido à sua alta taxa de deposição e alto controle de transferência metálica. Com a utilização do modo operacional CMT para manufatura aditiva é possível vencer com maior facilidade alguns desafios de deposição, por exemplo quando a acessibilidade é limitada ou a geometria da peça exige a deposição fora da posição plana. Conforme Kazanas *et al*. (2012), o modo CMT é capacitado para atender a deposição de paredes inclinadas de 0º a 180º, sem necessidade de material de suporte, e deposição de paredes horizontais com a liberdade de inclinação da tocha em 0º a 50º, sem perda de qualidade. Porém, para evitar ângulos agudos e possibilitar a realização de raios durante a usinagem pode ser utilizada a estratégia de construção por "pirâmide".

Williams *et al*. (2016) apontam a importância da seleção de parâmetros de regulagem para dominar a lei da gravidade durante a deposição na posição horizontal. A princípio, a manutenção de um volume depositado por unidade de comprimento (relação entre a velocidade de alimentação e velocidade de soldagem/deposição) não garante a formação estável do cordão/camada. A velocidade certa para esse volume é quem determina a formação do cordão/camada que se estabiliza através da força de tensão superficial. Martina *et al*. (2012) ressaltou que o modo CMT tem característica de formação de cordões/camadas bastante altos, maiores do que nos processos PAW e TIG, levando assim a menor quantidade de camadas por parede. Porém, a eficiência de deposição de material do CMT é um pouco inferior (80 %) comparando a outros processos (85 - 98%). Também o modo CMT se caracteriza pelo alto fator da eficiência térmica ($\eta = 0,9$), considerado como superior ao processo MIG/MAG DCEP ($\eta = 0,8$) e TIG ($\eta = 0,6$) e uma alta taxa de deposição, acima dos 3 kg/h (Sequeira Almeida e Williams, 2010). Dos limites de modo CMT podem ser citados: o envelope operacional restrito por *software* da fonte (limite de velocidade de alimentação), o crescimento linear da corrente e da velocidade de alimentação (impossibilidade de programar independente), e a capacidade reduzida de fusão de metal de base.

O modo operacional CMT tem sido aplicado para manufatura aditiva por deposição a arco de vários materiais, como ligas de aço ao carbono, de aço inoxidável e de alumínio. Para manufatura aditiva de ligas de titânio, tradicionalmente são utilizados mais os processos com alimentação externa de arames, como TIG, PAW, LBW, EBW (*University of Wollongong, University of Sheffield, etc.*). O processo MIG/MAG tem certas dificuldades em aplicação para ligas de titânio, como transferência metálica irregular, instabilidade de

arco e alta taxa de geração de respingos. Para superar essas particularidades é necessário passar por uma complexa tarefa de seleção de parâmetros. Porém, Sequeira Almeida e Williams (2010) declararam que com uso do modo operacional CMT esses obstáculos foram superados. Além disso, o modo proporciona uma microestrutura mais vantajosa em relação de outros processos. A aplicação de modo CMT para manufatura aditiva de liga de titânio foi ainda encontrada no trabalho de Kapustka (2012), porém por si tratar de uma apresentação de slides, não foram vistos os detalhes operacionais referentes.

A liga de titânio é um material de qualidades bastante diferenciadas. Algumas propriedades físicas e elétricas de titânio, em comparação com outros materiais, estão demonstradas na Tabela 1 (ASM Handbook).

Material	Liga de titânio	Liga de aço inoxidável	Aço ao carbono	Liga de alumínio
Densidade, g/cm3	4,4	7,9	7,8	2,7
Temperatura de solido-líquido, ^{0}C	1604-1660	1400-1455	1425-1538	646-657
Calor específico, J/g °C, 20 ^{0}C	0,53	0,5	0,49	0,9
Condutividade térmica, W/m K, 20 ^{0}C	6,7	16,2	51,9	231,0
Coeficiente de expanção térmica, μm/m K, at 500 ^{0}C	9,7	18,7	11,7	25,5
Resistividade elétrica, ohm cm x10^{-6}	55,6	-	9,71	2,66
Permeabilidade magnética, H/m	1,00005	1,008	1,82	-

TABELA 1. Propriedades físicas e elétricas de titânio e metais mais populares.

Visto a baixa condutividade térmica do titânio, a taxa de resfriamento também é baixa, demandando um tempo de espera entre as camadas, aplicação de uma estratégia de deposição ou/e uso de algum meio de aceleração de resfriamento. Martina *et al*. (2012) citaram que em manufatura aditiva metodologicamente correto esperar até que o material depositado chegue a 100 ºC antes de começar a nova camada. Também, deve ser lembrado que a temperatura do substrato afeta a tensão superficial da gota em transferência, o que afeta a geometria do cordão/camada. Conforme Wang *et al.* (2011), a formação do cordão/ camada de liga de titânio apresenta uma certa sensibilidade aos parâmetros de regulagem. A formação pode deteriorar caso a pressão do arco for elevada, o que se traduz em defeitos superficiais em forma de "*holes and humps"*. Conforme Martina *et al*. (2012) esses defeitos também são sensíveis ao uso de velocidades de soldagem elevadas.

Outra particularidade da liga de titânio é a alta reatividade do material em temperaturas elevadas e em estado líquido quando estão em contato com os gases atmosféricos, como oxigênio, nitrogênio, hidrogênio. A contaminação por esses gases afeta a plasticidade e resistência mecânica e pode levar até a falha em juntas soldadas. A temperatura referente a absorção ativa de oxigênio varia de fonte para fonte na literatura, a 600 ºC a 350 ºC,

enquanto que a contaminação por nitrogênio começa em temperaturas superiores a 550 ºC e por hidrogênio a 250 ºC ou 300 ºC. De uma forma interessante, a absorção ativa de hidrogênio acontece até 625 ºC, e depois de 700 ºC começa a dessorção do hidrogênio. Dessa forma, exige-se uma proteção gasosa do titânio líquido ou aquecido, depois da passagem de arco elétrico, por meio de *trailing gas*, câmera de vácuo ou fluxos especiais desoxigenados (Akulov, 1971). A proteção via um *trailing gas* é mais universal e de fácil adaptação às condições de soldagem/deposição. Existem versões comerciais do *trailing gas*, porém na maioria das vezes são produzidos especialmente para atender as condições particulares de cada caso.

Algumas observações relevantes em relação à construção de *trailing gas* estão rescritos nos trabalhos de Jacket *et al*. (2015) e Ding *et al*. (2015). Autores recomendam utilizar uma esponja metálica ou algum material poroso para promover fluxo laminar de gás de proteção e posicionar o *trailing gas* mais perto à superfície de proteção. Hoje em dia, o desenvolvimento de tecnologia de proteção por *trailing gas* apresenta soluções com capacidades múltiplas, que agrupam várias funções (proteção gasosa, direcionador de arame frio, pirômetro, etc.) em só um aparelho. A vazão de gás utilizada na proteção por *trailing gas* depende da energia de soldagem, dimensão do substrato, configuração do *trailing gas*, condições ambientais, etc. Foram encontrados vários valores de vazão na literatura, variando de 280 l/min (Stark *et al*., 1962) a 17 l/min (Hoye *et al*., 2013), indicando que é um parâmetro que talvez deva ser procurado por metodologia de tentativas e erros.

Assim, observa-se que o modo CMT já é bastante conhecido na área de soldagem e na manufatura aditiva de materiais mais comuns, contudo ainda há pouca informação sobre a aplicação para liga de titânio. O objetivo principal deste trabalho é realizar a avaliação exploratória de modo operacional CMT para fabricação de pré-formas de liga de titânio.

2 | METODOLOGIA

A bancada utilizada para esse trabalho consistiu novamente de um robô MOTOMAN HP 20-A0 com controlador NX100, uma fonte de soldagem TransSynergic 5000, Fronius com controle remoto RCU 5000i, um sistema de aquisição de dados, uma mesa de apoio, um suporte para corpo de prova, um dispositivo *trailing gas* e um pirômetro infravermelho.

Como material de base, utilizou-se chapas de liga de titânio Ti-6Al-4V com dimensões de 250 x 30 x 4 mm. O arame-eletrodo pertence à classe do material de base, sendo Ti-6Al-4V (especificação SAE AMS 4954J), com diâmetro de 1,2 mm. Como gás de proteção, foi utilizado Ar + 25 % He, com vazão de 13 l/min. Já no dispositivo *trailing gas* foi utilizado Ar 4.8 com vazão de 20 l/min colocado integralmente na parte traseira de *trailing gas*, sendo a parte frontal não foi utilizada. Dispositivo foi posicionado a 20 mm de distância do substrato (Figura 1).

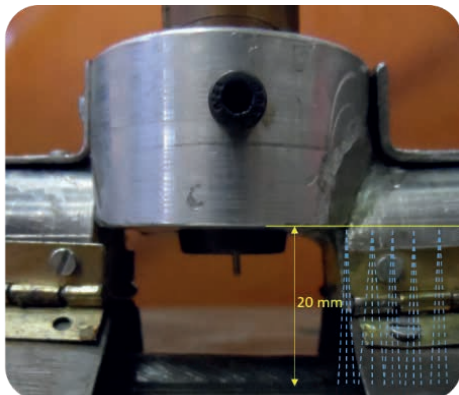



FIGURA 1. Posicionamento do *trailing gas* em relação ao substrato.

Durante a produção da parede foi utilizada a programação voltada ao alargamento da primeira camada, utilizando velocidade de soldagem reduzida e tecimento transversal. Também, foi utilizada a troca de sentidos de deposição de cada camada, sendo a primeira no sentido de vai e a próxima no sentido de vem, assim adiante (bi-direcional). Razão para isso foi a procura de controlar a igualdade de altura de parede ao longo de comprimento, evitando assim a formação de perfil de parede depositada com único sentido, sendo de altura maior no início e menor no final. Cada camada foi iniciada quando a depositada anteriormente havia chegado à temperatura ambiente (32 – 34 °C). A temperatura foi monitorada com um pirômetro ao infravermelho. Enquanto, a velocidade de alimentação real foi verificada a base de massa depositada por tempo de deposição (assumindo o rendimento de deposição como 100%) para os dois tipos de regulagem. Os parâmetros de regulagem utilizados estão apresentados na Tabela 2.

Camada	V_a (m/min)		cca	cd	V_s (cm/min)	DBCP (mm)	Tecimento transversal	
							F (Hz)	Ampl (mm)
1	8,3		0	0	30	13	3	4
De 2 a 12	8,0		0	0	32	13	-	-

Obs.: Va – velocidade de alimentação; cca – correção de comprimento de arco; cd – correção dinâmica; V_s – velocidade de soldagem; DBCP – distância bico de contato à peça; F – frequência de tecimento transversal; Ampl. – amplitude de tecimento

TABELA 2. – Parâmetros de regulagem.

3 I RESULTADOS E DISCUÇÕES

Os parâmetros monitorados estão na Tabela 3. A velocidade de alimentação verificada foi de 8,0 m/min para regulagem da primeira camada, e de 7,7 m/min para regulagem das camadas posteriores. Os oscilogramas de corrente e tensão de uma das

camadas, no caso da camada 2, estão apresentados na Figura 2.

Camada	Im (A)	Irms (A)	Um (V)	Urms (V)	Camada	Im (A)	Irms (A)	Um (V)
1	122,9	138,8	14,2	17,2	7	124,7	139,4	14,6
2	122,4	137,4	14,5	17,4	8	120,2	135,8	14,2
3	116,9	133,1	13,9	16,9	9	121,9	137,2	14,5
4	114,1	130,8	14,1	17,1	10	119,1	134,9	14,1
5	112,8	129,7	13,8	16,8	11	116,6	132,8	14,0
6	113,3	130,1	14,1	17,1	12	118,9	134,8	13,9

Obs.: I_m – corrente media; I_{rms} – corrente eficaz; U_m – tensão media; U_{rms} – tensão eficaz

TABELA 3. Parâmetros monitorados.

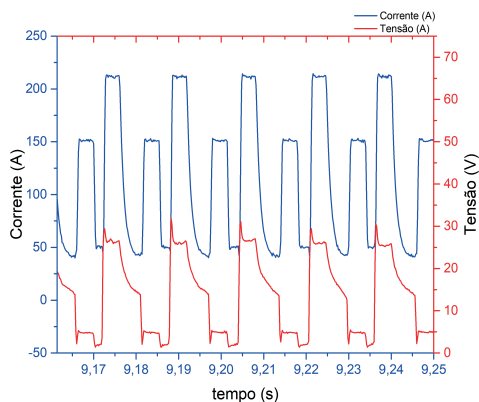



FIGURA 2. Oscilogramas de corrente e tensão da camada 2.

O processo se mostrou bastante estável sem a geração de respingos. Porém, durante toda deposição foi observada a instabilidade de arco do arco, representada pelos desvios aleatórios em direção de sentido de deposição. Os aspectos superficiais da parede depositada com uso de modo CMT, de ambos os lados, e o aspecto da seção transversal estão apresentados na Figura 3, enquanto os detalhes de macroestrutura estão na Figura 4.

FIGURA 3. Aspecto superficial dos ambos lados da parede e macroestrutura da seção transversal da parede depositada com modo CMT.

FIGURA 4. Macroestrutura de seção transversal com maior aproximação.

A parede demonstrou aspecto visual satisfatório com boa perpendicularidade ao substrato, pouca irregularidade geométrica e boa molhabilidade, sem nenhum indício de imperfeições. Os parâmetros geométricos e o fator *buy-to-apply* (relação entre área total de seção transversal e área efetiva de seção transversal, onde a área efetiva é definida pela metodologia descrita no trabalho de Kovalenko (2019) estão na Tabela 4.

Altura efetiva de parede (mm)	Altura média de camada	área total (mm^2)	área efetiva (mm^2)	Fator *buy-to-apply*	Largura média efetiva (mm)
34,2	4,3	214,2	186,9	1,15	5,5

TABELA 4. Parâmetros de avaliação da parede de Ti-6Al-4V.

Ainda, pode ser percebido que os grãos possuíram tamanhos médios e não estão se expandindo ao longo de várias camadas, que deve ser o resultado de técnica de troca de sentidos de deposição. O resultado coincide com resultado obtido por Saqueira Almeida e Williams (2010). Assim, ficou evidenciado que o modo operacional CMT tem um bom potencial para fabricação de pré-formas por manufatura aditiva.

4 I CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesse trabalho pode ser feitos as conclusões que processo MIG utilizado com modo operacional CMT para deposição de pré formas de liga de titânio apresentou aspecto visual satisfatório com boa perpendicularidade ao substrato, pouca irregularidade geométrica, boa molhabilidade, sem nenhum indício de imperfeições, com elevado índice de fatos *buy-to-aplay*, assim considera-se modo operacional adequado.

DECLARAÇÂO DE RESPONSABILIDADE

A autora é a única responsável por este trabalho

AGRADECIMENTOS

Autora agradece à CAPES pelo suporte com bolsa de doutorado, ao Laboratório para Desenvolvimento de Processos de Soldagem – LAPROSOLDA/UFU e a Pós-Graduação da FEMEC pela infraestrutura, equipamentos e consumíveis utilizados

REFERÊNCIAS

Akulov, A, I. Manual de soldagem. Ed. Engenharia mecânica. Moscou, p. 208, 1971

Ding, D.; Pan, Z.; Cuiuri, D.; Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. Critical Review. 2014

Ding, J.; Colegrove, P.; Martina, F.; Williams, S. Wiktorowicz, R; Palt, M.R. Development of a laminar flow local shielding device for wire + arc additive manufacture. Journal of Materials Processing Technology. v. 226, p. 99–105, 2015. Doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.07.005

Hoye, N. P.; Appel, E. C.; Cuiuri, D.; Li, H. Characterisation of metal deposition during additive manufacturing of TI-6AL-4V by arc-wire methods. Conference paper. p. 1015-1023, Jan., 2013

Jacket, S.; Hertel, M.; Rose, S.; Fussel, U. Evaluation and comparison of gas trailing shield concepts using diagnostic and numerical methods. IIW. Doc.XII-2244-15. 2015

Kapustka, N. Arc welding capabilities at EWI. 29 nov., 2012

Kazanas, P.; Deherkar, P.; Almeida, P.; Helen, L.; Willaims, S. Fabrication of geometrical features using wire and arc additive manufacture. Journal of Engineering Manufacture published. v. 1, n. 10, 2012 http://pib.sagepub.com/content/early/2012/02/17/0954405412437126

KOVALENKO, O. Avaliação de aspectos da estabilidade do arco e da geometria de pré-formas em manufatura aditiva utilizando o processo MIG/MAG CMT com foco na liga Ti-6Al-4V. 2019. 244 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil. Disponível em: http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.629

Lira V. M. Desenvolvimento de Prosesso de Prototipagem Rápida via Modelagem por deposição de formas livres sob temperatura ambiente de materiais alternativos. Tese de doutorado. Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 199 f, 2008

Martina, F.; Mehnen, J.; Williams, S. W.; Colegrove, P.; Wang, F. Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of TI–6AL–4V. Journal of Materials Processing Technology. v. 212, n. 6, p. 1377-1386, 2012

Sequeira Almeida, P. M.; Williams, S. Innovative process model of Ti–6Al–4V additive layer manufacturing using cold metal transfer (CMT). Proccedings of the 21st Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. The University of Texas at Austin, Austin, Texas, USA, p. 25-36, August 9-11, 2010

Stark, L. E.; Bartlo, L. J.; Porter, H. G. Welding of one-inch thick Ti-6Al-4V plate. Welding Journal. v. 41(9), p. 805-814, 1962

Wang, F.; Williams, S.; Rush, M. Morphology investigation on direct current pulsed gas tungsten arc welded additive layer manufactured Ti6Al4V alloy. Int J Adv Manuf Technol. v. 57, p. 597–603, 2011. DOI 10.1007/s00170-011-3299-1.

Williams, S. W.; Martina, F.; Addison, A. C.; Ding, J.; Pardal, G; Colegrove, P. Wire + Arc Additive Manufacturing. Materials Science and Technology. 2016

CAPÍTULO 4

COMPARATIVO DE PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS DE ROBÔS TERRESTRES AUTÔNOMOS COM PRECURSOR DE I.A. VERSUS TELEGUIADOS APLICADOS EM RESGATE DE VÍTIMAS

Data de aceite: 02/05/2023

Márcio Mendonça
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP
http://lattes.cnpq.br/5415046018018708

Francisco de Assis Scannavino Junior
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica UTFPR - Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/4513330681918118

Vicente de Lima Gongora
Faculdade da Indústria SENAI Londrina Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica- Londrina -PR
http://lattes.cnpq.br/6784595388183195

Janaína Fracaro de Souza Gonçalves
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica PP/CP
http://lattes.cnpq.br/1857241899832038

Wagner Fontes Godoy
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica UTFPR - Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/7337482631688459

Carlos Alberto Paschoalino
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica UTFPR - Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1518815195539638

Luiz Henrique Geromel
IFSP Instituto Federal de São Paulo -Campus Piracicaba - SP
http://lattes.cnpq.br/3945660888230811

Guilherme Cyrino Geromel
IFSP Instituto Federal de São Paulo -Campus Piracicaba - SP
linkedin.com/in/guilherme-cyrino-geromel-9391a5245

Rodrigo Rodrigues Sumar
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica UTFPR - Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1461760661483683

Marco Antônio Ferreira Finocchio
Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica UTFPR - Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/8619727190271505

Andressa Haiduk
Dimension Engenharia - Ponta Grossa - PR
http://lattes.cnpq.br/2786786167224165

Gustavo Henrique Bazan
Instituto Federal do Paraná, Campus Jacarezinho - PR
http://lattes.cnpq.br/7076940949764767

Fabio Rodrigo Milanez
Faculdade da Indústria SENAI Londrina
Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica- Londrina -PR
http://lattes.cnpq.br/3808981195212391

Fabio Nogueira de Queiroz
Centro Paula Souza
Faculdade de Tecnologia (FATEC)
http://lattes.cnpq.br/4466493001956276

Matheus Gil Bovolenta
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Acadêmico - departamento Acadêmico de
Engenharia Elétrica (DAELE) - Cornélio Procópio – PR
http://lattes.cnpq.br/1518815195539638

RESUMO: Os avanços tecnológicos possibilitam a criação de máquinas cada vez mais complexas, capazes de tomar decisões autônomas com base nos dados fornecidos ao sistema. Esses avanços geram questionamentos sobre a viabilidade desses processos em comparação com a ação humana. Este trabalho tem como objetivo comparar o planejamento de trajetórias de um robô móvel guiado por sensores aplicando metodologias de diferentes lógicas multivaloradas, com o planejamento de trajetórias de um robô móvel teleguiado pela habilidade humana. Ao final da análise dos dados obtidos, ainda que iniciais, observou-se que ambos os casos apresentam vantagens e desvantagens no processo, e de acordo com experimentos simulados para essa pesquisa os robôs teleguiados obtiveram vantagem. Deste modo, sugere-se a realização de futuros trabalhos com a implementação de sistemas inteligentes mais robustos para o planejamento de trajetórias. Esse trabalho se encerra com uma conclusão e sugere futuros trabalhos.
PALAVRAS-CHAVE: Robótica, Comparação de trajetórias, Lógica multivalorada.

COMPARISON OF PATH PLANNING OF AUTONOMOUS GROUND ROBOTS WITH AI PRECURSOR VS. TELEOPERATED ROBOTS APPLIED IN VICTIM RESCUE

ABSTRACT: Technological advancements enable the creation of increasingly complex machines capable of making autonomous decisions based on the data provided to the system. These advancements raise questions about the viability of these processes compared to

human action. This study aims to compare the trajectory planning of a mobile robot guided by computer vision, following methodologies of different multivalued logics, with the trajectory planning of a mobile robot remotely controlled by human skill. At the end of the analysis of the obtained data, although initial, it was observed that both cases have advantages and disadvantages in the process, and according to simulated experiments for this research, teleoperated robots had an advantage. Therefore, the implementation of more robust intelligent systems for trajectory planning is suggested for future work. This study concludes with a summary and suggestions for further research.
KEYWORDS: Robotics, Comparison of trajectories, Multivalued logic.

1 I INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da humanidade, a ideia de criar máquinas capazes de tomar decisões tem sido um sonho perseguido. Com o avanço da tecnologia, essa possibilidade está se tornando cada vez mais realidade. Hoje em dia, robôs já são amplamente utilizados na indústria e, em breve, espera-se que eles sejam tão comuns em nosso cotidiano quanto os celulares. Como destaca siciliano (2010), os robôs deixarão de ser apenas máquinas e se tornarão parte de nossas vidas de uma forma mais pessoal.

De acordo com Montana e Ben-Ari (2018), um robô pode ser definido como uma máquina capaz de realizar automaticamente uma série de ações programáveis por um computador. A robótica é uma área interdisciplinar que envolve conhecimentos das engenharias mecânica, elétrica, computação e outras áreas para o desenvolvimento de robôs para empreendimentos humanos. Os robôs e sistemas robóticos têm impactado significativamente a vida moderna em diversos aspectos, desde a produção industrial até a exploração aquática e espacial, passando pela área hospitalar, educação e entretenimento (Niku, 2001).

Desde o meio do século XX, houve as primeiras conexões entre a inteligência humana e as máquinas, originando as primeiras pesquisas em inteligência artificial (Siciliano, 2010). A inteligência artificial é o resultado tecnológico de sistemas baseados na inteligência humana, tendo como resultado a capacidade de tomar decisões autônomas, baseadas em um banco de dados pré-estabelecido e constantemente atualizado (Russell, 2016)

A disputa entre seres humanos e inteligência artificial é um tema que tem ganhado cada vez mais destaque nos últimos anos. Embora a ideia de que as máquinas podem superar as habilidades humanas em diversas áreas possa parecer futurista ou até mesmo ficção científica, a verdade é que já estamos vivenciando a crescente presença e influência da inteligência artificial em nossas vidas (BOSTROM, 2014).

A disputa entre a inteligência artificial e a humana tem sido um tema de interesse em diversas áreas, desde a ciência da computação até a filosofia. Essa questão pode ser exemplificada por meio de batalhas entre humanos e máquinas em jogos de tabuleiro.

Um exemplo clássico dessa disputa foi a partida de xadrez entre Garry Kasparov, o então campeão mundial de xadrez, e o computador *Deep Blue*, desenvolvido pela IBM. Em 1996, a primeira partida foi vencida por Kasparov, mas em 1997, o computador venceu a disputa. Segundo (Hsu et al., 2002), a derrota de Kasparov foi resultado de um conjunto de fatores, incluindo a pressão da mídia e a estratégia adotada pelo programa de computador.

Outro exemplo foi a partida de Go entre o campeão mundial Lee Sedol e o programa de inteligência artificial *AlphaGo*, desenvolvido pelo Google *DeepMind*. Em 2016, em uma série de cinco partidas, o programa venceu quatro vezes. De acordo com (Silver et al., 2017), a vitória de *AlphaGo* foi resultado de uma combinação de técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais profundas.

Esses exemplos evidenciam como a inteligência artificial tem avançado no campo dos jogos de tabuleiro, superando jogadores humanos em algumas ocasiões. No entanto, a inteligência artificial ainda não é capaz de igualar a capacidade cognitiva e criativa dos seres humanos em outros campos, como na interpretação de contextos e na resolução de problemas complexos fora de ambientes controlados.

Por um lado, a inteligência artificial tem demonstrado um enorme potencial em áreas como medicina, finanças, transporte, entre outras. Algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais, por exemplo, têm sido usados para analisar grandes quantidades de dados e encontrar padrões que seriam difíceis ou impossíveis para os seres humanos identificarem sozinhos. Isso pode levar a descobertas importantes e impactar positivamente a vida das pessoas.

Por outro lado, há preocupações de que a inteligência artificial possa substituir seres humanos em muitos trabalhos, o que poderia levar a um aumento do desemprego e a uma desigualdade econômica ainda maior. Além disso, há preocupações éticas em relação à maneira como a inteligência artificial é usada, especialmente quando se trata de tomar decisões importantes que afetam a vida das pessoas, como a liberdade condicional ou a concessão de empréstimos (RUSSEL, NORVIG, 2016)

No entanto, muitos especialistas argumentam que a competição entre seres humanos e inteligência artificial não deve ser vista como uma batalha pela supremacia, mas sim como uma parceria em que os seres humanos e a inteligência artificial trabalham juntos para alcançar objetivos comuns. Embora a inteligência artificial possa ser capaz de realizar tarefas específicas com mais eficiência do que os seres humanos, ela ainda carece da capacidade de tomada de decisão e compreensão do contexto que os seres humanos possuem naturalmente. Dessa forma, a colaboração entre seres humanos e máquinas pode levar a resultados ainda melhores do que quando trabalhamos separadamente (TEGMARK, 2017).

A motivação deste trabalho é com a evolução tecnológica, os processos manuais estão sendo substituídos por robôs autônomos, resultando em uma melhoria na execução das atividades e redução do tempo gasto. Porém, é necessário avaliar até que ponto é

viável a utilização desses sistemas em um processo. E, de acordo com o título, os alvos podem ser diversos, entretanto, podem ser vítimas de um acidente que precisam de resgate em áreas inóspitas Mendonça et all (2019).

Como identificar os limites de eficiência dos sistemas autônomos em relação aos controlados pela inteligência humana? Essa é uma questão que se levanta diante do crescente uso de processos automatizados e de inteligência artificial. É importante comparar o desempenho de um processo autônomo com um controlado por humanos em um mesmo ambiente para avaliar até que ponto a ação autônoma pode se aproximar da ação controlada por seres humanos.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2, fundamentos de tópicos circunscritos a pesquisa, como por exemplo a cinemática. Já a seção 3 apresenta alguns detalhes da construção do protótipo incluindo alguns detalhes de visão robótica e sobre o cenário empregados para os experimentos. A seção 4 apresenta uma discussão dos resultados obtidos. E, finalmente, a seção 5, conclui e endereça futuros trabalhos.

2 I FUNDAMENTOS

2.1 Cinemática

Para o projeto será utilizado um robô móvel, sendo que para a especificação de sua posição é necessário estabelecer uma relação entre o mapa de referência do campo de teste e o mapa de referência local do robô. A Figura 1 mostra a pose do robô, coordenadas do baricentro, exemplo, e o ângulo formado para localização do mesmo. O conceito de pose é um fundamento da robótica. Nessa figura também é possível identificar o eixo XY global e do robô autônomo terrestre.

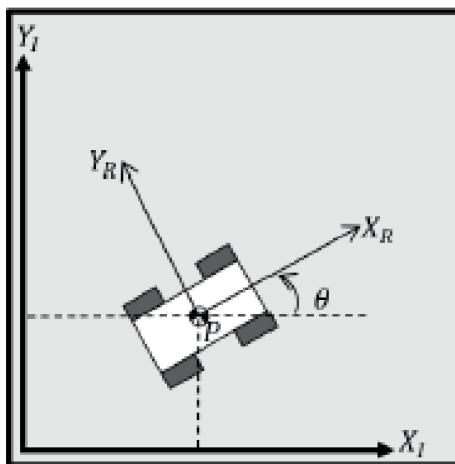



Figura 1 – Pose do robô no plano

2.2 Visão Computacional

Uma área que clássica na robótica (FAUGUERAS,2003); cresce exponencialmente nos últimos anos, apesar de não ter sido empregada nessa pesquisa. A visão computacional é uma área da computação que busca modelar a visão humana em máquinas, permitindo que computadores enxerguem e compreendam o mundo visual de forma similar a nós seres humanos. Essa área envolve a captura de imagens e o processamento dessas, a fim de extrair informações relevantes para reconhecer, manipular e analisar objetos e cenas presentes nas imagens (GONZALEZ; WOODS, 2000).

As etapas da visão computacional incluem a aquisição da imagem, o pré-processamento, a segmentação de regiões da imagem, a extração de características e o processamento de dados. Essas etapas são divididas em dois grupos: o processamento digital de imagens e a análise de dados de imagens (Figura 4) (SILVA; MONTEIRO; RIBEIRO, 2018).

A aquisição de imagens digitais é feita por meio de sensores presentes nas câmeras digitais. No pré-processamento, são aplicados métodos de processamento de imagens para facilitar a extração de características, como realçar o contorno de objetos na imagem (GOMES, 2001). A segmentação é a etapa em que se separa as partes da imagem que interessam para a análise posterior.

Em alguns casos, é necessário o pós-processamento para corrigir os defeitos da segmentação. A extração de características é onde são levantadas as informações relevantes obtidas na imagem. Por fim, essas características são usadas no reconhecimento de padrões e na classificação dos elementos desejados na análise (GOMES, 2001).

Como demonstrado no fluxograma apresentado na Figura 4, a combinação dessas etapas permite a extração de dados a partir de uma imagem, possibilitando o funcionamento da visão computacional

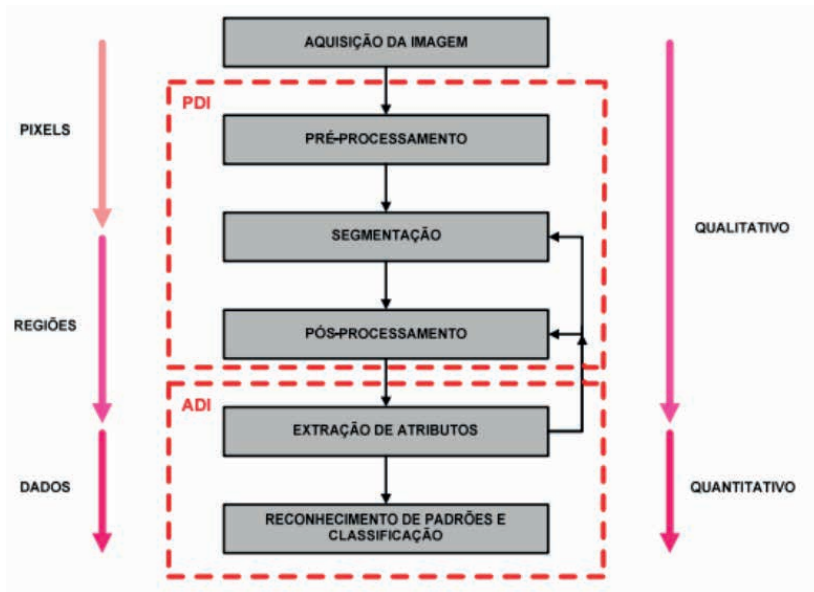



Figura 2 – Etapas da Visão Computacional

2.3 sensores ultrassom

Um tipo de sensor de grande utilidade em automação, sensoriamento de obstáculos para robô, de objetos em linhas de montagem é o sensor ultrassônico. Sem precisar de contacto físico com o objeto ou ainda de propriedades especiais desse objeto, ele não só detecta sua presença como ainda tem recursos para determinar a distância em que ele se encontra. Em diversos projetos dessa revista temos mostrado robôs que fazem uso de sensores ultrassônicos. Formados por um emissor e um receptor, eles podem detectar a presença de objetos ou obstáculos e indicar a distância em que eles se encontram se for necessário.Esses sensores, como o da foto acima, podem ser encontrados numa ampla variedade de formas, dependendo da aplicação, sendo usados também na indústria e na automação de diversos tipos de equipamentos.O princípio de funcionamento deste tipo de sensor tem algo a ver com a biônica, pois se baseia no sonar dos morcegos, que já abordamos em outros artigos que escrevemos.Para entender bem o funcionamento desses sensores será importante partirmos das próprias propriedades dos sons. A Figura 3 mostranum modelo usado em ronótica

Figura 3– sensor ultrassom

3 I DESENVOLVIMENTO

A figura 3 mostra uma visão global do desenvolvimento de uma pesquisa de trabalho de conclusão de curso, na qual foi baseado esse artigo, entretanto, não será escopo desse artigo explorar todos os itens importantes e relevantes, e sim os resultados e as conclusões do mesmo de acordo com a proposta cientifica do confronto entre I.A. x I.H. (inteligência humana). A figura 4 mostra escopo simplista projeto.

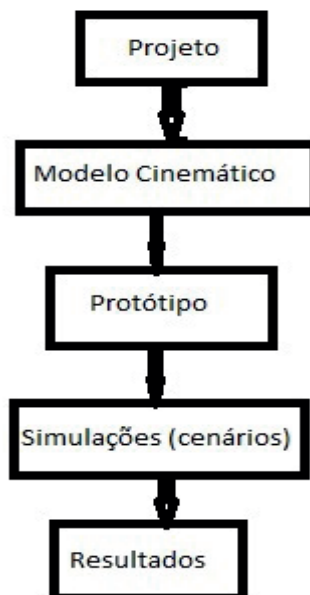



Figura 4–Estrutura de desenvolvimento

3.1 Plataforma Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto, criada na Itália em 2005 por Banzi e Cuartielles. É fácil de usar, mesmo para iniciantes, e oferece uma ampla gama de opções de entrada e saída, como portas analógicas, digitais e de comunicação, além de interfaces para módulos externos. Com o Arduino, é possível construir uma variedade de dispositivos eletrônicos, desde projetos simples até projetos mais complexos, como robôs controlados por dispositivos móveis. Além disso, o Arduino conta com uma grande comunidade on-line, que compartilha fóruns, tutoriais e projetos, tornando o aprendizado e o desenvolvimento de projetos com Arduino mais fácil e acessível para todos.

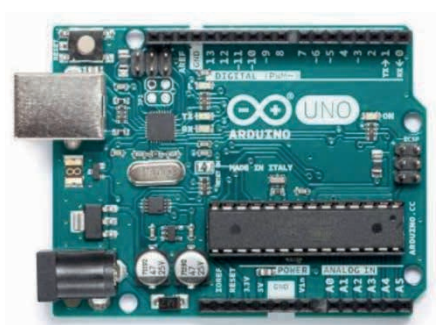



Figura 5: Arduino Uno - microprocessador empregado protótipo

Para desenvolvimento de um protótipo além do microprocessador são necessárias baterias, as chamadas ponte - H, modulo para conectar o Arduino nos atuadores, as rodas, controladas por um sinal de PWM, que apesar dos motores usados foram de corrente contínua, teve resultados satisfatórios, com um bom controle de velocidade do mesmo.

Modulo de comunicação *bluetooh serial port* HC-06, o sensor ideal seria de visão robótica, entretanto. Figura 6 mostra um robô com sensores ultrassom, simulados nessa pesquisa o que aliás é recorrente em pesquisas com técnicas de I.A. Mendonça, et all (2019),

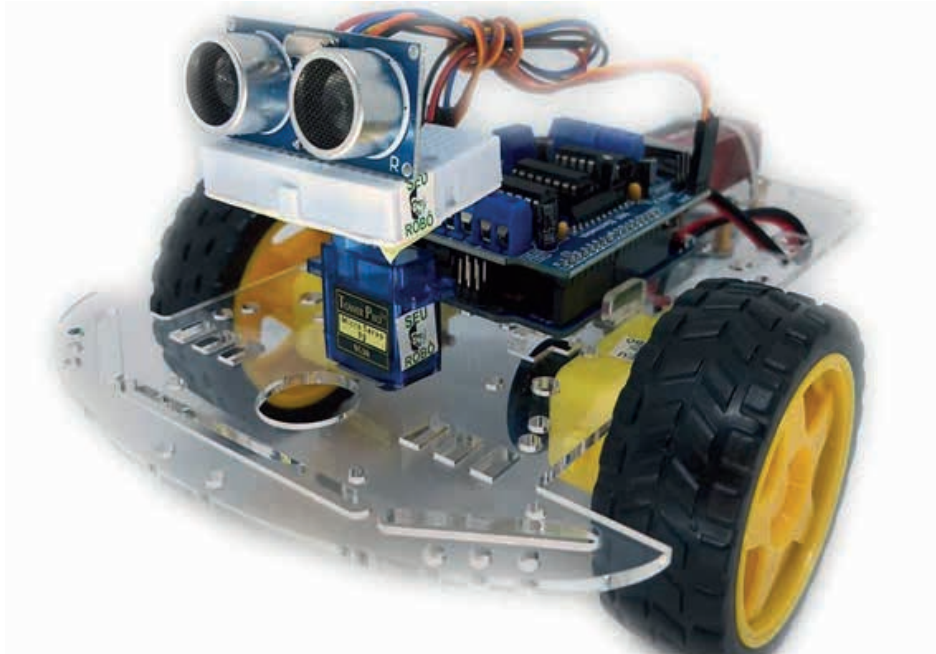



Figura 6: robô terrestre genérico com Arduino

3.2 Lógica Multivalorada

A lógica multivalorada é uma abordagem lógica que permite a existência de mais de dois valores de verdade, diferentemente da lógica clássica binária que trabalha apenas com valores verdadeiros e falsos. Essa lógica é considerada precursora da lógica fuzzy, pois ambas lidam com a incerteza e a imprecisão de dados e são aplicadas em diversas áreas, desde a robótica e inteligência artificial até a economia e a medicina.

De acordo com Avron e Zamansky (2019), a lógica multivalorada surgiu como uma alternativa à lógica clássica binária para lidar com problemas que envolvem graus de verdade diferentes de verdadeiro e falso. Já a lógica fuzzy, que foi desenvolvida por Lotfi Zadeh na década de 1960, expande ainda mais essa ideia, permitindo que as variáveis tenham graus de pertinência a um determinado conjunto.

Em comparação com a lógica clássica binária, a lógica multivalorada é considerada mais adequada para lidar com problemas complexos e incertos, uma vez que permite que as variáveis tenham mais de dois valores de verdade. Segundo Novak (2013), essa abordagem permite que sejam modeladas situações em que as informações disponíveis são imprecisas ou incertas, o que é comum em diversos problemas do mundo real.

Portanto, a lógica multivalorada é uma abordagem lógica importante e precursora da lógica fuzzy, sendo considerada mais adequada para lidar com problemas complexos e incertos do que a lógica clássica binária. Essa abordagem tem sido amplamente utilizada

em diversas áreas, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas inteligentes e soluções em diversas áreas.

4 | RESULTADOS

A simulação em robótica é uma técnica amplamente utilizada para testar algoritmos, estratégias de controle, programação de movimento, entre outras aplicações, antes de implantá-los em robôs reais. Essa técnica pode ser realizada em diferentes tipos de ambientes, como simulações em computador, testes em bancadas de laboratório ou em ambientes externos.

Existem diversos softwares de simulação de robôs disponíveis no mercado, como o Gazebo, V-REP, ROS, entre outros. Esses softwares permitem a criação de modelos virtuais de robôs e a simulação de suas interações com o ambiente em que estão inseridos. Além disso, permitem a programação de movimentos e a execução de tarefas específicas.

Uma das vantagens da simulação em robótica é a possibilidade de testar diferentes cenários e condições em um ambiente controlado e seguro. Além disso, a simulação pode ser utilizada para treinar algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais, permitindo que o robô aprenda a realizar tarefas complexas de forma autônoma.

Dentre as referências que abordam a simulação em robótica, podemos citar Lynch, K., & Park, F. (2017). Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2021). Quigley, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., & Wheeler, R. (2009). Koenig, N., & Howard, A. (2004).

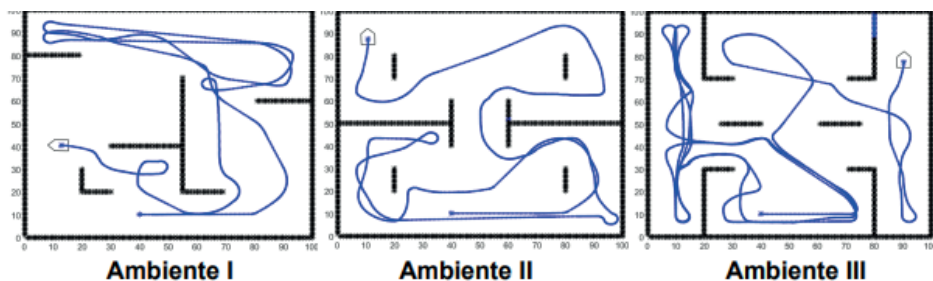



Figura 7: Resultados nos três cenários com lógica multivalorada

Os resultados foram comparados em um ambiente de simulação em três ambientes idênticos ´para que se possa sugerir autonomia no caso do robô controlado por logica, como mostra a Figura 7, e o robô teleguiado como mostra a figura 8. Já a figura 9 mostra o robô teleguiado por humano, pode-se observar que os resultados teleguiados foram mais objetivos e não fizeram manobras em “falso” como pode-se observar nos resultados com a lógica. O que sugere melhores resultados nessa disputa por meio de experimentos

simulados, a prototipação deverá ser empregada com robô utilizado no artigo Mendonca et all (2020).

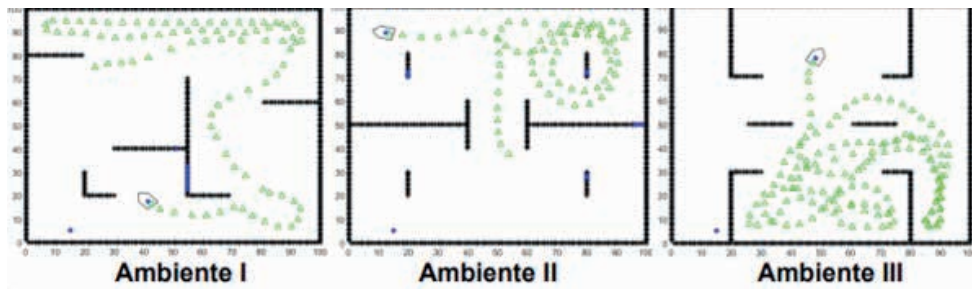



Figura 8: Resultados nos três cenários teleguiados

Uma próxima etapa, após experimentos simulados será um robô do laboratório AARLAB empregado uma variação do robô como mostra figura 7, empregado no trabalho de Mendonça et all (2020).

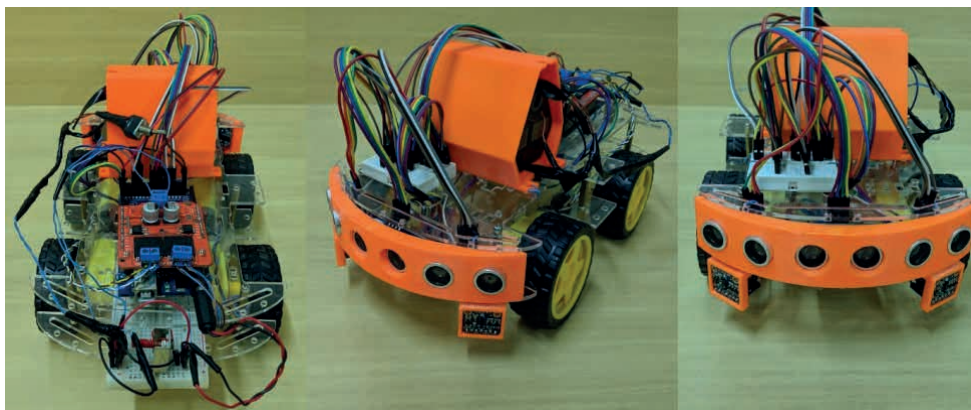



Figura 9: Protótipo em fase conclusiva

5 I CONCLUSÃO

Este trabalho comparou o desempenho de um robô teleguiado com o de um robô controlado por sensores e robôs simulados. Um cenário foi projetado para fornecer posição necessária e um algoritmo foi desenvolvido para calcular a cinemática necessária para que o robô siga o caminho correto. A otimização da trajetória foi feita com um algoritmo A* que simulou todos os caminhos possíveis e determinou o caminho mais otimizado. Foram testadas duas lógicas multivaloradas diferentes para controlar o movimento do robô. Os resultados mostraram que o robô controlado por visão computacional foi mais preciso e menos propenso a erros, enquanto a habilidade do operador de controle do robô teleguiado

foi o principal diferencial no tempo de percurso.

Nos três cenários idênticos comparados houve uma vantagem média de acima de 50% para os robôs teleguiados. Ressalta-se que essa ampla vantagem não deve ser generalizada e sim contextualizada nessa investigação cientifica,

Para trabalhos futuros, pretende-se construir um sistema autônomo baseado em *fuzzy cognitive maps* adaptados, sistemas computacionais inteligentes mais robustos como supracitados, para uma comparação mais equiparada,

É sugerida a construção de um cenário maior para uma coleta de dados mais precisa e análise de desempenho das lógicas de decisão adotadas. Além disso, no caso de experimentos com protótipos é recomendado o uso de uma fonte de alimentação mais adequada com menor peso e tensão de 7,4V para melhorar a durabilidade do sistema. Por fim, é sugerido o uso de motores de passo para melhorar a precisão e o controle de posição do robô.

Uma última possível contribuição futura, neste contexto com de robôs autônomos e teleguiados (o que aliás já está em andamento) é uma combinação das duas técnicas de forma semelhante ao pulverizador da JACTO o Arbus 4000 JAV, o qual é autônomo, mas em situações drásticas, como uma arvore no caminho, pode deixar de ser autônomo e voltar a ser teleguiado, para a posteriori retor a condição inicial.

REFERÊNCIAS

Banzi, M., & Cuartielles, D. (2005). Getting Started with Arduino. Retrieved from https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage.

BOSTROM, Nick. Superintelligence: paths, dangers, strategies. Oxford University Press, 2014.

FAUGERAS, O. (1993). Three-Dimensional Computer Vision, A Geometric Viewpoint. [S.l.]: MIT Press. ISBN 0-262-06158-9.

GOMES, J. Visão Computacional: Conceitos e Fundamentos. Rio de Janeiro: Axcel Books, 2001.

HSU, Feng-hsiung et al. Behind Deep Blue: Building the Computer that Defeated the World Chess Champion. Princeton University Press, 2002.

MENDONÇA, M. et al. Semi-Unknown Environments Exploration Inspired by Swarm Robotics using Fuzzy Cognitive Maps. In: 2019 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), New Orleans, LA, USA, 2019. p. 1-8. DOI: 10.1109/FUZZ-IEEE.2019.8858847.

MENDONÇA, M.; PALÁCIOS, R. H. C.; PAPAGEORGIOU, E. I.; SOUZA, L. B. de. Multi-robot exploration using Dynamic Fuzzy Cognitive Maps and Ant Colony Optimization. In: 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Glasgow, UK, 2020. Proceedings... Glasgow, UK: IEEE, 2020. p. 1-8. DOI: 10.1109/FUZZ48607.2020.9177814.

NIKU, B. S. Introduction to robotics: Analysis, systems, applications. New Jersey: Prentice Hall, 2001

QUIGLEY, M., Conley, K., Gerkey, B., Faust, J., Foote, T., Leibs, J., & Wheeler, R. (2009). “ROS: An Open-Source Robot Operating System.” In ICRA Workshop on Open-Source Software.

RUSSELL, Stuart J.; NORVIG, Peter. Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson Education Limited, 2016.

SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Handbook of Robotics**. Springer, 2010

SIEGWART, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2021). Introduction to Autonomous Robots: Mechanics and Control (2ª ed.). MIT Press.

SILVA, L. C. S.; MONTEIRO, C. B. M.; RIBEIRO, M. A. C. Introdução à Visão Computacional. 2018. Disponível em: https://www.ic.unicamp.br/~mc102/2018/projeto-visao/pdfs/VisaoComputacional.pdf. Acesso em: 09 abr. 2023.

SILVER, David et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. Nature, v. 529, n. 7587, p. 484-489, 2016.

TEGMARK, Max. Life 3.0: Being Human in the Age of Artificial Intelligence. Alfred A.

SOBRE O ORGANIZADOR

HENRIQUE AJUZ HOLZMANN - Professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Graduação em Tecnologia em Fabricação Mecânica e Engenharia Mecânica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Mestre em Engenharia de Produção pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Doutor em Engenharia e Ciência do Materiais pela Universidade Estadual de Ponta Grossa. Trabalha com os temas: Revestimentos resistentes a corrosão, Soldagem e Caracterização de revestimentos soldados.

ÍNDICE REMISSIVO

INNOVATE:

ENGENHARIA MECÂNICA

www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br
@atenaeditora
www.facebook.com/atenaeditora.com.br

Atena
Editora
Ano 2023